

EBULIÇÃO NUCLEADA EM PLACA PLANA COM
GERAÇÃO TRANSIENTE DE CALOR


Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JA
NEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS (D.Sc.).

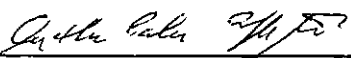
Aprovada por:



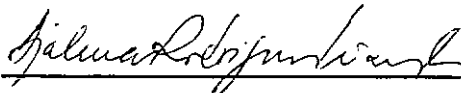
Dr. Maury Saddy
Presidente



Dr. Alcir de Faro Orlando



Dr. Arthur Palmeira Ripper Neto



Dr. Djalma Rodrigues Filho



Dr. Luiz Bevilacqua

ESTADO DO RIO DE JANEIRO - BRASIL

NOVEMBRO DE 1975

i

a Eliane

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Maury Saddy cuja orientação segura e objetiva possibilitou a realização deste trabalho.

Ao professor Daniel Dejean, professor visitante do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação pela dedicação no projeto e execução do amplificador de potência e suas interconexões.

Ao professor Gerhard Schwarz do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação pela assistência recebida durante a pesquisa experimental.

Aos professores da COPPE que contribuíram para minha formação.

Ao CNPq e BNDE pelo suporte financeiro recebido.

A Srta. Enidete Silva Souza pelo trabalho datilográfico.

RESUMO

Em uma placa de platina mergulhada em água à temperatura de saturação, são geradas em regime transiente rampas de potência de duração de 191,25ms e 200ms. Experimentalmente são determinadas as variações da temperatura da placa, da potência gerada e do fluxo de calor transmitido ao líquido em relação ao tempo. O sistema experimental segue o princípio do termômetro de resistência, que compreende a variação da resistência ôhmica da placa com a temperatura. O controle dinâmico é feito em malha fechada por intermédio do computador híbrido EAI-TR 48, DES-30.

É proposto para explicação do fenômeno um modelo teórico de mecanismo de transferência de calor considerando os regimes de pré-ebulição e ebulição nucleada. O modelo admite no regime de ebulição, uma distribuição uniforme para o crescimento de bolhas discretas ao longo do tempo na superfície da placa e leva em conta uma saturação de bolhas na placa.

ABSTRACT

In a flat platinum ribbon immersed in saturated pool water at atmospheric pressure, power is uniformly generated at a linearly increasing rate with durations of 191,25ms and 200ms. The variation with time of the ribbon temperature, power generated and energy release rate transferred to the liquid, are experimentally determined. The method applied in the experiments follows the resistance thermometry principle, and the dynamic control is made with the aid of a closed loop system using the hybrid computer EAI-TR48, DES-30.

To explain the phenomenon, a theoretical model for the heat transfer mechanism is proposed which considers the pre-boiling and the nucleate boiling regimes. The model assumes a uniform spacial distribution for the bubbles which grow on the flat surface and a saturation density for the number of bubbles on the surface.

ÍNDICE

CAPÍTULO	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. EQUIPAMENTOS E TÉCNICA EXPERIMENTAL	
2.1 Descrição do Sistema Geral	6
2.2 Geração	
2.2.1 Geração de Potência	8
2.2.2 Controle do Pulso Rampa	11
2.3 Elementos de Medidas	
2.3.1 Elemento Primário e Célula	11
2.3.2 Medidas Elétricas	15
2.3.3 Registro dos Dados de Ebulição	15
2.4 Calibração Estática	19
2.5 Técnica Experimental	
2.5.1 Medidas Elétricas	22
2.5.2 Medidas no Filme	25
3. MODELO TEÓRICO	
3.1 Introdução	27
3.2 Descrição do Modelo	28
3.3 Região sem Ebulição	29
3.4 Região com Ebulição	
3.4.1 Taxa de Calor Absorvido no Sistema para Geração e Crescimento de Bolhas	31
3.4.2 Temperatura da Placa	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	
4.1 Resultados Experimentais	36
4.2 Região sem Ebulição	47
4.3 Região de Ebulição Nucleada	50

	Pág.
5. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS BÁSICAS	55
REFERÊNCIAS ADICIONAIS	58
SIMBOLOGIA	59
APÊNDICE	
1. Variação da Resistência Ôhmica da Placa de Platina com a Temperatura	62
2. Temperatura Adiabática da Placa	64
3. Temperatura da Placa e Fluxo de Calor Transmi- tido ao Líquido por Condução Transiente	65
4. Fotografias	69
5. Dados Experimentais	72

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		Pág.
(2.1)	Sistema Geral	7
(2.2)	Geração de Potência	9
(2.3)	Esquema do Sistema de Controle	12
(2.4)	Interligação Amplificador de Potência e Computador	12
(2.5)	Controle da Potência	13
(2.6)	Plaqueta de Platina	14
(2.7)	Tensões nas Extremidades do Resis- tor Padrão (V_{AB}) e da Placa (V_B) ⁻	16
(2.8)	Circuitos de Comando e Interligação entre o Computador e a Unidade Lógica	18
(2.9)	Calibração do Sistema	20
(2.10)	Calibração em Regime Permanente: valores das tensões em função dos níveis de corrente	21
(2.11)	Esquema da Montagem Experimental	23
(2.12)	Dimensões para as Bolhas	26
(4.1), (4.3), (4.5)	Potência Gerada na Placa e Fluxo de Calor Determinado pelo Modelo	37, 39, 41
(4.2), (4.4), (4.6)	Perfis de Temperatura para Várias Idealizações de Operação Transiente ..	38, 40, 42
(4.7), (4.8)	Aspectos das Bolhas Geradas na Superfície da Placa	43, 44
(4.9), (4.10)	História do Crescimento de Bolhas na Placa	45, 46

	Pág.
(4.11) Constante de Crescimento β	48
(4.12) Espessura da Camada Limite Térmica Segundo a Equação da Condução	49
(4.13) Determinação Gráfica do Tempo Ini- cial de Formação de Bolhas na Placa	52
(A.1) Determinação da Variação da Resis- tência da Platina com a Temperatura	63

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A ebulição é caracterizada pela transferência de calor a um líquido na temperatura de saturação ou próximo dela, correspondente à pressão do sistema, ocorrendo mudança de fase de parte do líquido em vapor. Esse processo de transferência de calor tem numerosas aplicações, englobando de equipamentos com finalidade primária de vaporizar líquidos, às situações onde se deseja retirar calor de uma superfície a altas taxas com a menor variação possível da temperatura de parede.

Devido às solicitações tecnológicas, o conhecimento do fenômeno da ebulição tem se constituído num permanente desafio à ciência. A etapa inicial dos estudos de ebulição deu-se em 1948 e foi dirigida com a finalidade de ser projetado o reator para o submarino Nautilus, Leppert (12).

A ebulição é classificada segundo Leppert (12) em ebulição nucleada heterogênea, ebulição nucleada homogênea e ebulição por filme. A ebulição nucleada heterogênea se distingue pelo crescimento de bolhas em pontos ativos - os centros de nucleação - existentes na superfície de aquecimento. Nesse tipo de ebulição são transferidas grandes taxas de calor com a mínima variação possível da temperatura da superfície aquecedora.

Na ebulição nucleada homogênea, que é bem rara, bolhas de vapor se formam espontaneamente no líquido. Essa ebulição ocorre em líquidos puros aquecidos por radiação e em solução salina na qual exista geração de calor na massa do fluido, utilizada em certo tipo de reator nuclear.

A ebulição por filme se caracteriza por sua vez pelo envolvimento da superfície aquecedora por vapor superaquecido. Compara

da com a ebulição nucleada, a ebulição por filme requer da superfície de aquecimento uma variação de temperatura maior, para um mesmo fluxo de calor.

A ebulição nucleada heterogênea é o tipo de ebulição de maior utilização industrial, porque através dela combina-se a transferência de grande quantidade de calor com uma variação mínima de temperatura da superfície aquecedora. Nas aplicações tecnológicas é necessária essa variação mínima de temperatura para evitar-se a destruição por fusão da superfície aquecedora ou simplesmente satisfazer condições específicas de projeto.

A ebulição nucleada heterogênea pode ser obtida através dos regimes de geração permanente e transiente de energia. No regime permanente o fluxo de calor da superfície aquecedora para o líquido, é aumentado gradualmente e nesse caso o calor é transferido por convecção. A partir do surgimento de bolhas na superfície aquecedora e até um valor de fluxo máximo de calor, o processo de transferência passa a ser por ebulição nucleada com geração permanente de energia, Leppert (12), Torikai (21), Van Stralen (23). Recentes desenvolvimentos teórico-experimentais nessa área estão distribuídos em diferentes linhas de pesquisa e abrangendo os seguintes tópicos: otimização de geometria para aquecedores, efeito das propriedades dos fluidos, determinação do máximo calor a ser trocado sem danos ao aquecedor, condições da superfície de aquecimento, história da ebulição, emissão de ruídos sonoros por sistemas em ebulição, aumento forçado da troca de calor por diversas técnicas como vibrações, campos eletrostáticos, aditivos nos líquidos, etc.

Na ebulição nucleada em regime transiente de geração de energia o calor é transferido da superfície aquecedora para o líquido inicialmente por condução transiente. Após o aparecimento de bolhas e até um nível máximo de calor ocorre a ebulição nucleada transiente, Hall (9), Johnson (10,11), Tachibana (20), Yiesin (24). Somente através desse processo de transferência de calor, pode um líquido receber em curto intervalo de tempo grande quantidade de

calor a partir de uma superfície que sofre pequena variação de temperatura. Os estudos da ebulição nucleada heterogênea com geração transiente de energia tiveram início na década de 60 e no momento eles têm sido intensificados, Bergles (2). Isto se deve à necessidade de serem projetados dispositivos para trocas térmicas em plantas nucleares. Entretanto são encontrados poucos artigos nessa área. Segundo Bergles (2) as pesquisas sobre esse tipo de ebulição são realizadas predominantemente em grandes laboratórios governamentais e industriais, enquanto a pesquisa nas universidades carece de apoio financeiro. Como a produção de artigos científicos é feita pela pesquisa universitária, resulta daí o pequeno número de trabalhos publicados. Além disso, esse fato aponta para o caráter sigiloso da pesquisa em ebulição nucleada transiente, ligado a produção de know-how tecnológico.

Os artigos publicados em ebulição nucleada transiente têm como objetivo a obtenção de dados experimentais sob diferentes condições e a construção de um modelo matemático que interprete o fenômeno. Para a construção do modelo matemático os autores desses artigos basearam-se em suposições diferentes. Hall (9) e Tachibana (20) - o primeiro utilizando água a várias temperaturas e geração de energia em forma de exponencial e o segundo água à temperatura de saturação e geração em rampa - obtiveram à pressão atmosférica, dados experimentais na região de ebulição, mas só propuseram modelo para a região em que a ebulição não se dá. Yiesin (24) partindo de dados experimentais para ebulição transiente em água sub-resfriada à pressão atmosférica e geração em rampa, instituiu um modelo baseado nos modelos de geração de energia em regime permanente de Cooper-Lloyd (6) e Foster-Zubber (8). Johnson (10) utilizou correlações empíricas determinadas para o regime permanente para confrontar com seus dados experimentais, obtidos por geração transiente de energia em forma de exponencial, em água sub-resfriada a diferentes pressões.

Em artigo anterior Johnson (11) a partir de experimentos em ebulição com geração transiente exponencial em água sub-resfriada a pressão atmosférica, estendeu o trabalho de Rosenthal-Miller,

que estabelecia a impossibilidade do processo transiente ser equivalente a uma sequência de condições permanentes. Desenvolveu assim um método visando a determinação da taxa de vapor produzido em regime transiente de geração de energia. Esse método segundo o autor, apresenta uma limitação decorrente da necessidade de ser determinado experimentalmente o tempo de aparecimento da primeira bolha na superfície de aquecimento.

Sakurai (16) pesquisou experimentalmente a ebulição nucleada em água a várias temperaturas, com geração de energia sob forma exponencial transiente e permanente. Baseado nesse estudo afirmou que o comportamento da ebulição nucleada na região do fluxo máximo de calor, é semelhante tanto para a geração transiente como para a permanente, a excessão de grandes resfriamentos para a água e pequenas durações de geração de energia. Em função disso institui uma expressão analítica para determinação do fluxo máximo de calor no regime de ebulição nucleada transiente.

Traçando um paralelo entre esses trabalhos, verifica-se que Yiesin (24), Sakurai (16) e Johnson (10) utilizam modelos e correlações empíricas obtidas para o regime permanente de geração de energia, para dar conta da ebulição nucleada em regime transiente. Hall (9) e Tachibana (20) não propuseram modelo para o regime de ebulição nucleada transiente. Hall somente estabeleceu para a região de ebulição, o raio crítico de uma cavidade na superfície aquecedora para início da nucleação. Johnson (11) baseando-se em Rosenthal-Miller, não utilizou o regime permanente de geração de energia para estudar o regime transiente.

O presente trabalho estuda a ebulição nucleada heterogênea com geração transiente de energia, sem recorrer ao regime permanente de ebulição. O método experimental desenvolvido a partir de Sakurai (16) e Yiesin (24) proporcionou a obtenção de dados que possibilitaram a formulação de um modelo que prescindiu de referência ao regime permanente de ebulição. Esse modelo foi construído a partir de um balanço macroscópico de energia no sistema constituído de superfície aquecedora (placa) e líquido (água à temperatura

ra de saturação e a pressão atmosférica). Para elaboração do modelo considerou-se a existência de uma saturação do número de bolhas na superfície da placa, apesar do fluxo de calor crescer sempre com o tempo. Essa saturação é consistente com a forma de frequência de distribuição adotada. Nesse caso o que aumenta com o tempo é a frequência de borbulhamento.

No estudo experimental, a potência transiente é gerada sob a forma de rampa e são empregadas três declividades diferentes. De-seja-se verificar por meio de medidas elétricas e filmagem das bolhas, o comportamento do sistema experimental em relação às rampas utilizadas. Essas rampas com as durações correspondentes foram escolhidas de acordo com a velocidade de filmagem utilizada, a fim de permitir a análise experimental da passagem do regime de condução transiente para o de ebulição nucleada. Pretende-se assim determinar o tempo em que se dá o aparecimento da primeira bolha na superfície de aquecimento e observar o crescimento de bolhas isoladas nessa superfície.

O objetivo deste trabalho é explorar numa faixa de potência relativamente baixa, da ordem de 25 W/cm^2 e de longos tempos de geração transiente como 200ms, o regime de ebulição nucleada com geração de bolhas discretas.

CAPÍTULO 2

EQUIPAMENTOS E TÉCNICA EXPERIMENTAL

2.1 - Descrição do Sistema Geral.

Para o estudo experimental da ebulição nucleada em regime de fluxo de calor transiente em meio heterogêneo, foi utilizado o sistema indicado na Fig. 2.1. Nessa figura identificam-se os seguintes elementos: sistema de ebulição constituído de uma célula contendo líquido à temperatura de saturação, uma plaqueta metálica totalmente imersa e um resistor padrão conectado em série com essa plaqueta e localizada fora da célula. Pela passagem da corrente elétrica acima de certo valor na plaqueta, ela se aquece, passando a operar como gerador de bolhas de vapor. O resistor padrão servirá para a determinação do nível de corrente do circuito, conhecida a tensão em seus terminais.

Os sistemas de geração e controle asseguram respectivamente o nível de potência desejado, sua forma e duração. O sistema de aquecimento mantém o líquido à temperatura de saturação. Pela filmagem são fixados no tempo os perfis das bolhas que são geradas e que crescem na placa. A iluminação provê o nível requerido para o contraste nítido entre a silhueta da bolha e o meio fluido.

Para obtenção da potência gerada e da temperatura média da plaqueta, utiliza-se o princípio do termômetro de resistência: uma variação de temperatura na plaqueta metálica acarreta uma correspondente alteração da resistência ôhmica e consequentemente variação na tensão elétrica medida entre suas extremidades, Foltz (7). O sistema de registro de dados mede esta variação de tensão na plaqueta em simultaneidade com a tensão nas extremidades do resistor padrão.

Os dados utilizados para análise são aqueles obtidos do filme e das medidas elétricas. Esses dois tipos de dados exigem processos diferentes de obtenção, que serão posteriormente especificados.

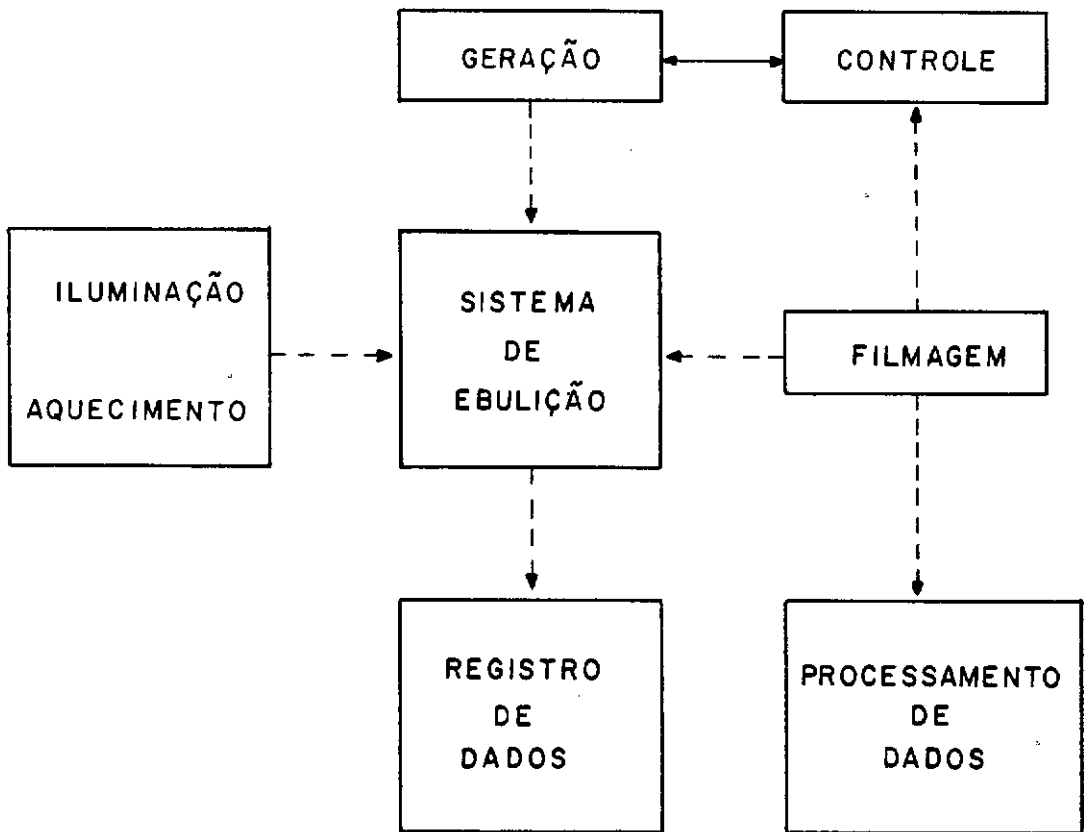


FIG.2.1 Sistema Geral

2.2 - Geração.

2.2.1 - Geração de Potência.

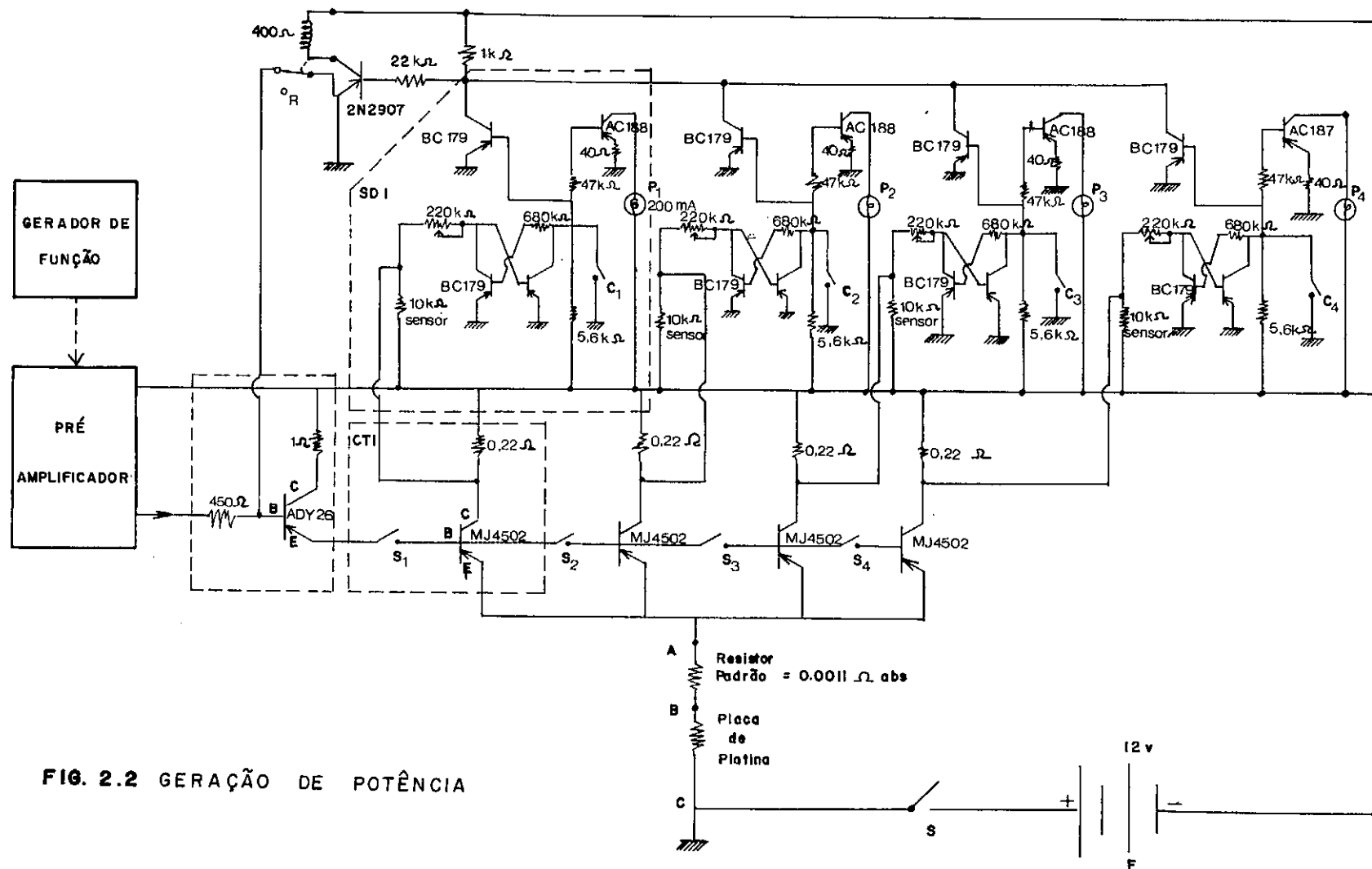
Para fixação da duração e do nível de potência necessários, verificou-se em estudos de ebulição nucleada em regime transiente de geração de potência em placas realizados por diversos autores: Sakurai (16), Tachibana (20), Yiesin (24), que a duração máxima utilizada é de 300ms e os níveis encontrados estão na faixa de 500W a 40KW.

Adotou-se para fins de projeto uma potência de 480W e a fonte de alimentação contínua. Escolheu-se uma bateria de 12V, admitindo 10V como tensão nominal. A corrente para o circuito deve alcançar 48A. A potência deve ser gerada durante curto intervalo de tempo e deve obedecer à forma de uma função predeterminada.

Comercialmente não foi encontrado um gerador-amplificador de potência preenchendo estas condições. Dessa forma foi desenvolvido um circuito amplificador de potência transistorizado associado a um elemento gerador de função.

O amplificador devido ao porte de seus elementos foi montado numa estrutura prismática retangular feita de perfis metálicos leves tendo 0,5m de lado e 1,5m de altura. Utilizou-se como condutores: barras de cobre, cabos e terminais para 12V e 100A.

A Fig. 2.2 mostra o sistema de geração de potência constituído pela associação de três elementos: gerador de função, pré-amplificador e amplificador de potência. Baseando-se em Sakurai(16), único a utilizar computador analógico em estudos de ebulição, empregou-se o computador híbrido EAI-TR 48, DES-30 na geração de uma função idêntica à da potência que se quer gerar na placa e de mesma duração. Este sinal transiente de pequena tensão é pré-amplificado no amplificador (Hewlett Packard mod. HP 467A) até um nível necessário à operação do circuito amplificador de potência. O amplificador de potência é constituído basicamente de quatro circui



tos transistorizados e em paralelo, ligados ao resistor de carga (plaqueta metálica). Por meio de chaves (S) pode-se selecionar um ou mais circuitos (CT) alterando-se o nível de corrente na placa.

O relay (R) é mantido com seus contactos fechados na posição de repouso. Ao ser fechada a chave (S*) a fonte (F) é aplicada ao circuito e ativa o relay (R) que passa a ter contactos abertos. A base do transistor ADY 26 é liberada para receber o sinal do pré-amplificador.

Um sistema disjuntor (SD) associado deve cortar a corrente quando houver sobrecarga no circuito. Isto é conseguido pela comparação com o valor limite de 20A fixado para cada circuito da corrente que passa. Se for ultrapassado este valor determinado, o sistema de proteção atua no relay (R) desativando-o, ou seja, este passa a ter contactos fechados. É aplicada então uma tensão positiva à base do transistor ADY 26 fechando-o, não havendo mais amplificação. A indicação de sobrecarga em qualquer circuito (CT) é indicada pelo acendimento de lâmpada piloto (P) no sistema (SD) correspondente e para retorno às condições iniciais deve ser acionado o botão (C).

O transistor ADY 26 associa as funções de chave e de comando dos demais transistores de potência MJ 4502.

A fonte de corrente contínua utilizada no circuito é uma bateria de 12V de grande capacidade de carga.

Como condição de experimentação a potência gerada na placa deve ser linear com o tempo e deve durar um intervalo de tempo da ordem de décimos de segundos.

2.2.2 - Controle do Pulso Rampa.

Devido à variação da resistência ôhmica da plaqueta com a temperatura e a condição pré-estabelecida da potência a ser gerada ser linear com o tempo, é necessária a introdução de uma correção instantânea no sinal de alimentação do amplificador de potência. Com isto se evita a distorção com o tempo da forma linear requerida para a potência gerada. Sakurai (16) utilizou nesse controle um circuito em malha fechada, mas não indicou detalhes.

Conseguiu-se bom resultado com o controlador do tipo PID, isto é, aquele de ação proporcional, integral e diferencial. Sendo montado em circuito no computador analógico. Nas Figs. 2.3 e 2.5 estão representados respectivamente o sistema de controle em diagrama de blocos e o circuito analógico do controle e geração de potência.

O monitoramento da forma do sinal enviado ao amplificador de potência é conseguido por intermédio do osciloscópio com memória: 141B oscilloscope, Dual Trace Amplifier mod. 1408A da Hewlett Packard.

As interligações das extremidades da placa e do resistor padrão com o computador analógico são feitas com fio coaxial e são inseridos resistores de proteção contra sobrecargas nas tensões de entrada. É adotado um nível comum de aterramento. Veja Fig. 2.4.

2.3 - Elementos de Medidas.

2.3.1 - Elemento Primário e Célula.

A plaqueta metálica é de platina tendo dimensões em milímetros 0,05 x 2,5 x 25, com o formato indicado na Fig. 2.6 e determinada a partir dos trabalhos de Akiyama (1), Tachibana (20), Yiesin (24).

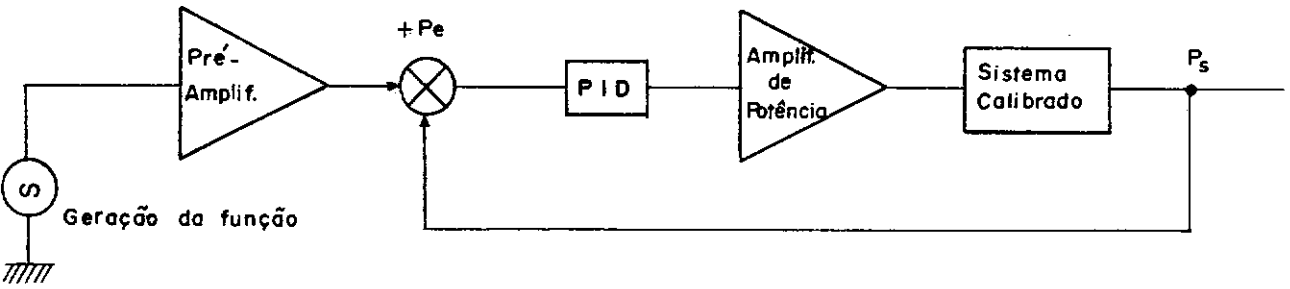


FIG. 2.3 Esquema do Sistema de Controle

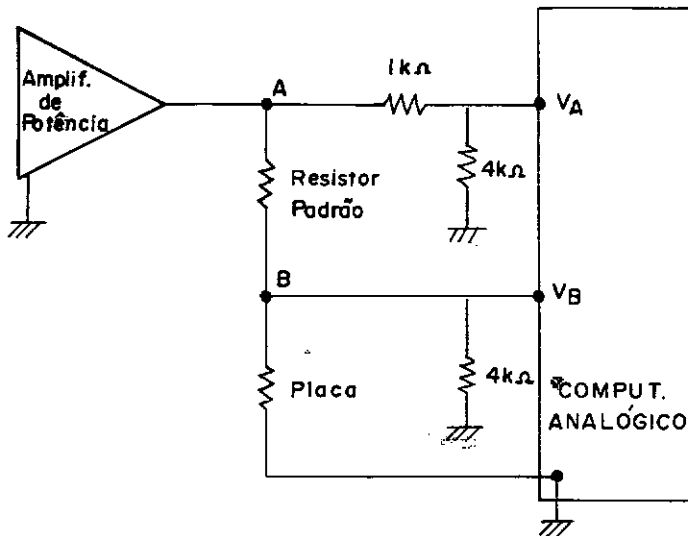
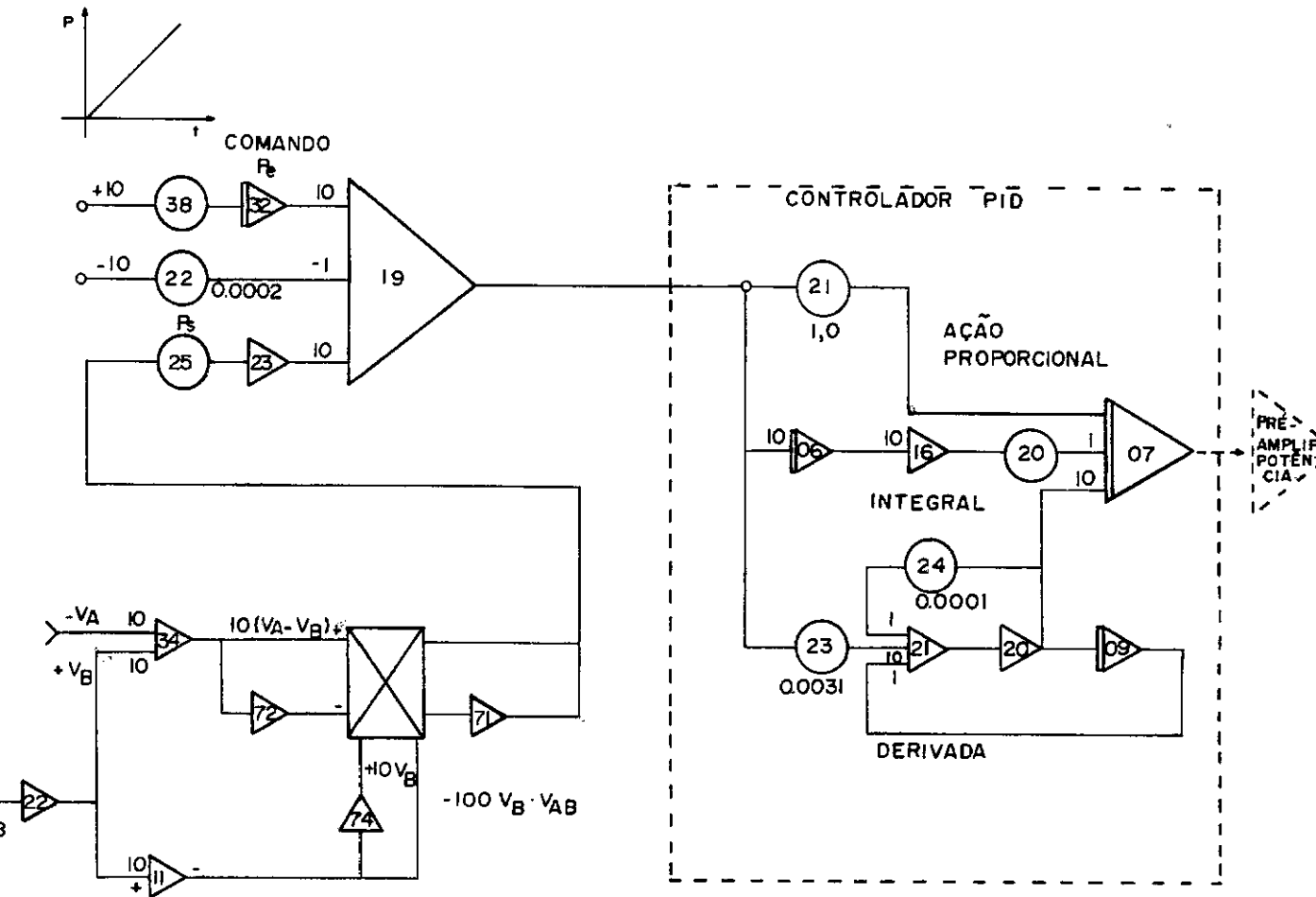
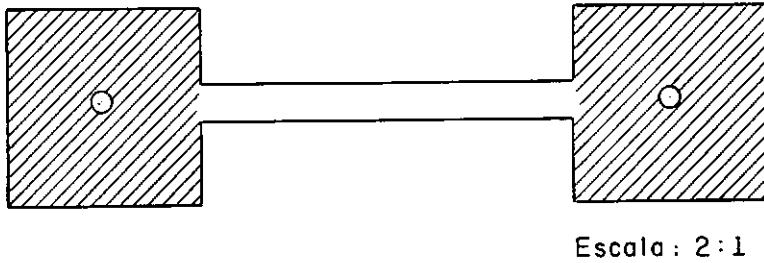


FIG 2.4 - Interligação Amplificador de Potência e Computador





Escala: 2:1

Fig. 2.6 - Plaqueta de Platina.

As regiões hachureadas são de fixação aos eletrodos. Os terminais de fixação são de cobre de seção transversal quadrada de 12,5mm de lado. Na extremidade superior são rosqueados permitindo fixação rígida dos contactos, como regulagem da profundidade da placa dentro da célula. Têm comprimento total de 150mm.

A célula é um paralelepípedo feito de chapas de alumínio com dimensões em mm: 140 x 140 x 90, sendo provido de dois visores de vidro oticamente plano. A tampa da célula é de fenolite, tendo orifícios para fixação dos eletrodos e termômetros. Foi elaborada com base em Van Stralen (23).

No momento de realização das experiências a célula está cheia de água destilada e deionizada à temperatura de saturação. Este aquecimento da água é conseguido em duas etapas. Como aquecimento inicial utiliza-se uma chapa de resistência elétrica doméstica e um termômetro controlador Jumo, mantendo-se a temperatura em torno de 85°C. A elevação posterior da temperatura do líquido até 100°C é conseguida por aquecimento com duas lâmpadas de infravermelho de 250W cada, controladas por um Variac. A manutenção da água nesta temperatura sem a existência de bolhas no seio do líquido é conseguida após três a quatro operações cíclicas de resfriamento e aquecimento até a temperatura de saturação.

Como a placa de platina opera como termômetro de resistência, é necessário o conhecimento da variação de sua resistência

Ôhmica com a temperatura como indicam Cole (4) e Tachibana (20). Isto é conseguido experimentalmente por calibração para a faixa de temperaturas entre 0 e 213°C, sendo obtida a expressão:

$$r = 27,31264(1 + 2,3593 \times 10^{-3}T_w + 2,95536 T_w^2);$$

para T_w em °C e r em Ω .

2.3.2 - Medidas Elétricas.

Como o valor ôhmico da placa é da ordem de 35m Ω e o do resistor padrão é igual a 0,0011 Ω abs, as tensões instantâneas nas suas extremidades deverão ser diferencialmente amplificadas. Utilizam-se amplificadores tipo S-II da Dynograph Beckman, Inst.Inc. Estes sinais amplificados são levados ao gravador de dois canais tipo 7001 da Brüel Ekjoer na velocidade de gravação de 152,4 cm/s.

O registro gráfico das duas tensões é obtido a posteriori na velocidade de reprodução de 3,81cm/s e utiliza-se um traçador Plotter Recorder 7000/7001A da Hewlett Packard. A Fig.2.7 mostra um registro obtido para as duas tensões.

2.3.3 - Registro dos Dados de Ebulição.

O perfil horizontal da superfície da placa e as bolhas resultantes da geração de potência são filmados durante o tempo da experiência. A utilização simultânea da filmagem e o registro de medidas elétricas nesse regime de ebulição são encontrados em Johnson (11), Lurie (13), Tachibana (20) e Yiesin (24).

Com o intuito de se estabelecer uma escala de medida para avaliação das dimensões das bolhas filmadas, coloca-se próximo à placa e preso ao eletrodo de fixação, um estilete de diâmetro calibrado em 1mm \pm 0,05mm.

Utiliza-se uma filmadora de alta velocidade Fastax, mod.

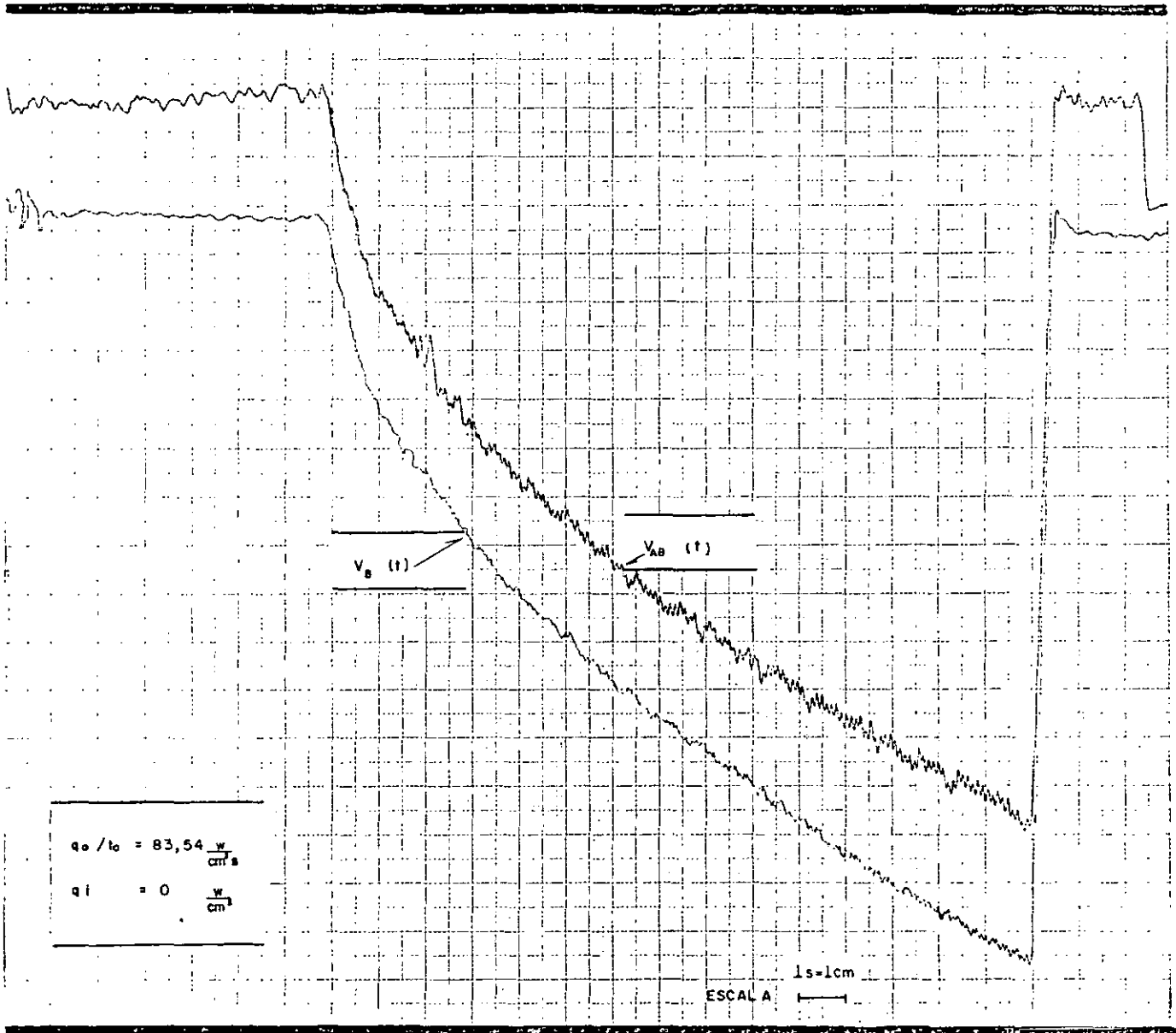


Fig.2.7 - TENSÕES NAS EXTREMIDADES DO RESISTOR PADRÃO (V_{AB}) E DA PLACA (V_B).

WF 3, Cat.I do Red Lake Lab.Inc.' e filmes de alta velocidade de 100 pés, ASA 160 tipo TRI-X Reversal Film Kodak. A filmadora tem curvas de variação de velocidade em quadros/s contra número de pés de filme, para os diversos níveis de tensão aplicada. Escolhe-se o nível de 110V em princípio pela facilidade de alimentação e da disponibilidade máxima permitida de corrente nominal para as instalações utilizadas.

A filmagem é feita na faixa de velocidades em torno de 4000 quadros/s, seguindo Johnson (20) e Lurie (13). Este valor é alcançado após um período de aceleração do filme de 0,6s conforme a curva correspondente ao nível de 110V.

Conclui-se então que a filmadora deve ser acionada cerca de 0,6s antes do tempo zero da experiência, que é o tempo de partida para o sistema de geração de potência. Este atraso no início da geração é conseguido pelo acoplamento da filmadora com a unidade digital DES-30, que tem um contador interno que pode ser ajustado por meio de circuito apropriado.

Para marcar no filme o período da geração de potência, a câmara possui internamente uma lâmpada do tipo NE2J que é acesa pelo comando de controle de tempo. A fonte utilizada é de 220V, baixa tensão mod. 500-02A Brasele Eletrônica S.A. Os diversos circuitos utilizados estão na Fig. 2.8.

A iluminação para filmagem foi conseguida com lâmpada de 500W colocada atrás da célula e orientada diretamente à lente da filmadora, sendo utilizado como filtro solução de sulfato de cobre, Saddy (15).

Para análise dos dados das bolhas nos filmes foi utilizado o equipamento Nac Film Motion Analyser Model 16-S.

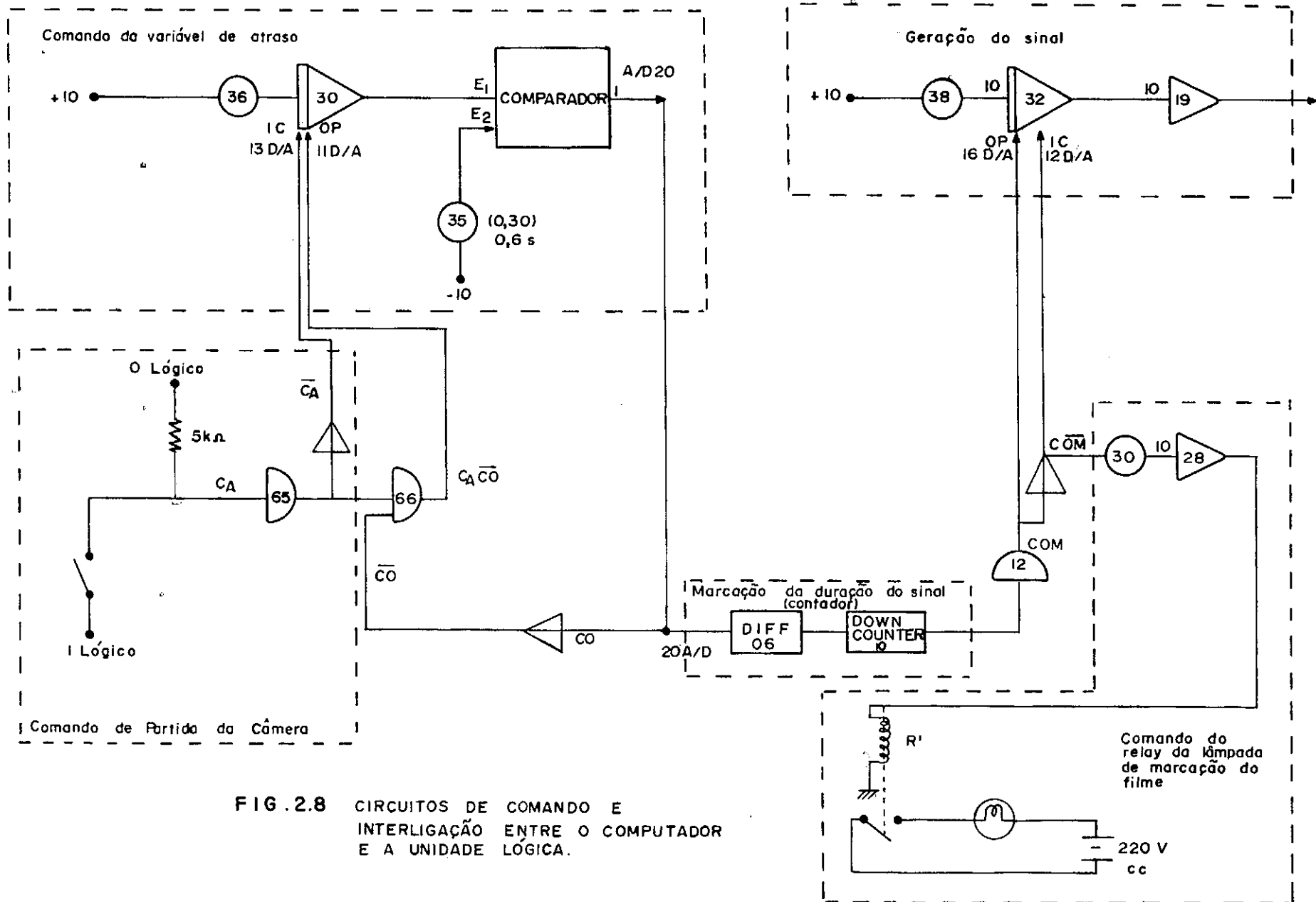


FIG. 2.8 CIRCUITOS DE COMANDO E INTERLIGAÇÃO ENTRE O COMPUTADOR E A UNIDADE LÓGICA.

2.4 - Calibração Estática.

A fim de serem obtidos os valores reais das tensões em milivolts à partir da Fig. 2.7, foi necessário efetuar a calibração do sistema de medidas descrito no § 2.3.2.

Utilizou-se a calibração do sistema em regime permanente segundo o esquema da Fig. 2.9.

O procedimento utilizado para a calibração foi o seguinte: aumentou-se gradualmente a corrente contínua no sistema por intermédio de ajuste no pré-amplificador, sendo lido seu valor no amperímetro. No voltímetro digital lê-se para cada nível de corrente estabelecido os valores reais das tensões nas extremidades da placa e do padrão (V_B e V_{AB}), sendo feita gravação simultânea destes sinais com o gravador na velocidade de 152,4cm/s. A reprodução destes sinais foi feita com o gravador na velocidade de 3,81cm/s e o traçador com a velocidade de 0,5s/cm. Foram utilizadas as escalas de 0,5V/cm e 25mV/cm para o registro em papel milimetrado das tensões V_B e V_{AB} respectivamente. Na Fig. 2.10 tem-se em escala reduzida os registros obtidos para os dois canais de gravação e em diversos níveis de corrente. As tensões foram medidas num 3450A Multi-function meter e as correntes num amperímetro DC mod. 428B, ambos da Hewlett Packard.

Em virtude de cada nível de corrente corresponder aos valores lidos no voltímetro digital de V_B e V_{AB} , pode-se fazer a correspondência direta, usando a Fig. 2.10, entre número de quadros e tensão em mV. Utilizando-se o método de ajustagem por mínimos quadrados obtém-se as seguintes retas de calibração:

$$V_{AB} = 1,35442 \text{ (Nº Quadros)} + 2,5029673$$

$$V_B = 52,21350 \text{ (Nº Quadros)} - 35,74293.$$

Mantendo-se as mesmas características das escalas adotadas em regime estacionário para o regime transiente, poderão ser adota

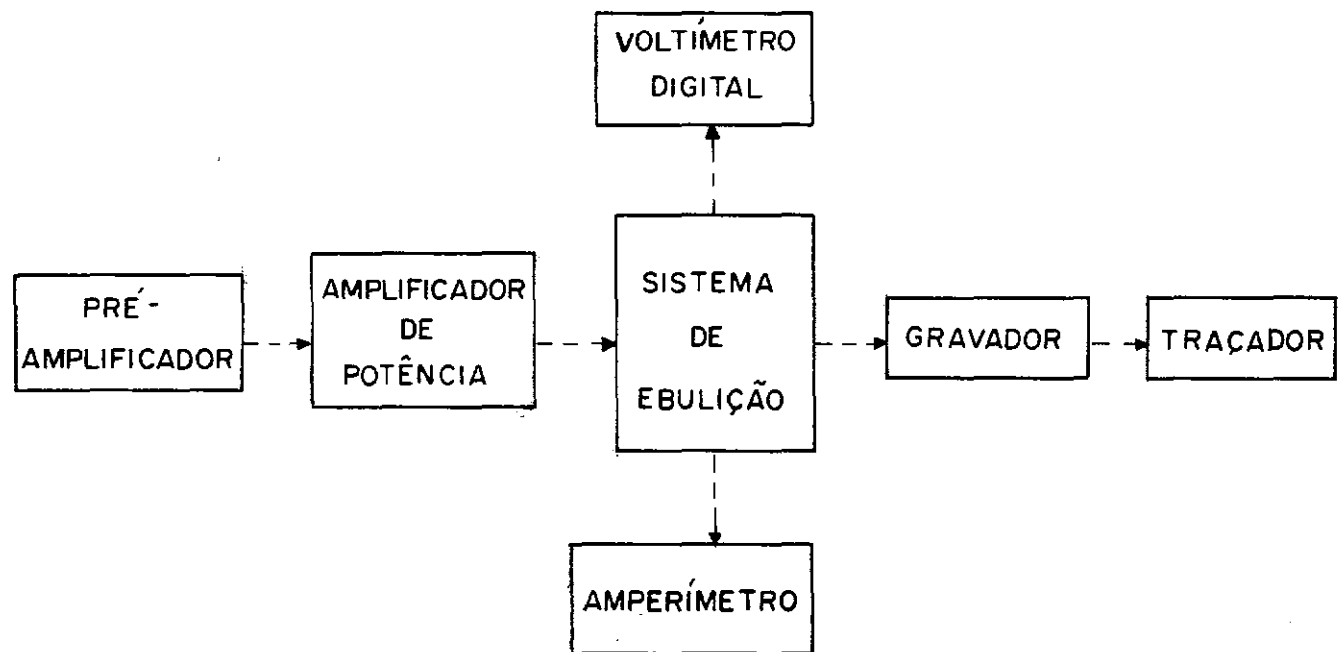


FIG. 2.9 Calibração do Sistema

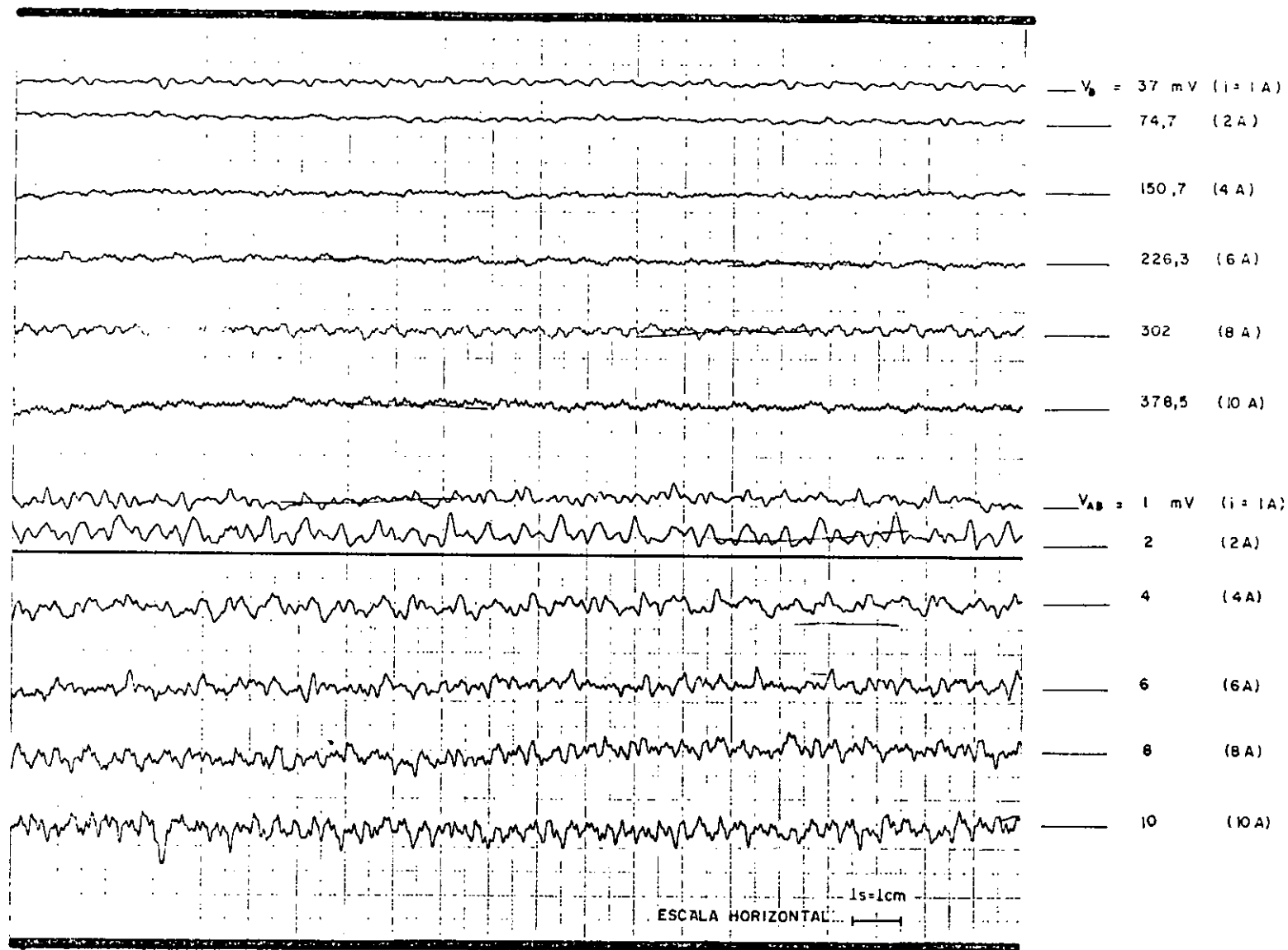


Fig. 2.10 - CALIBRAÇÃO EM REGIME PERMANENTE:
 VALORES DAS TENSÕES EM FUNÇÃO DOS NÍVEIS DE CORRENTE.

das as mesmas retas de calibração.

Para determinação da escala das abcissas, foi estabelecida a relação entre as escalas do gravador e do traçador. Escala do traçador: 0,5cm/s, razão de escalas para o gravador: $3,81 \frac{\text{cm}}{\text{s}} / 152,4 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$. Dessa forma a escala gráfica das abcissas é de:

$$0,5 \frac{\text{s}}{\text{cm}} \cdot 3,81 \frac{\text{cm}}{\text{s}} / 152,4 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = \frac{1}{80} \frac{\text{s}}{\text{cm}}$$

e o tempo para qualquer ponto nas curvas da Fig. 2.10 é:

$$\text{tempo de geração} = N^{\circ} \text{ em centímetro de sinal traçado} \times 1/80. \\ (\text{em s})$$

2.5 - Técnica Experimental.

2.5.1 - Medidas Elétricas.

Considerando o sistema indicado na Fig. 2.11 já calibrado, o procedimento experimental utilizado para o estudo da ebulição nucleada em regime transiente foi realizado de acordo com o que será descrito a seguir.

Na célula de ebulição o líquido é mantido na temperatura de saturação ou muito próximo dela sem existência de bolhas, dando-se início assim à experimentação. O nível de potência requerido e os tempos de controle necessários já devem estar ajustados na unidade analógica EAI-TR 48 e na lógica DES-30. O controlador PID que assegura a forma linear para a potência gerada já deve ter sido regulado com auxílio do osciloscópio de memória.

Dispara-se a câmara de filmar, sendo este sinal enviado ao contador de tempo DES-30 que manda um sinal de comando atrasado de 0,6 segundos ao computador analógico. Dessa forma o computador analógico espera a filmadora atingir a velocidade nominal requerida. Recebido o sinal, o computador gera a função rampa que é enviada para os circuitos de potência e de controle.

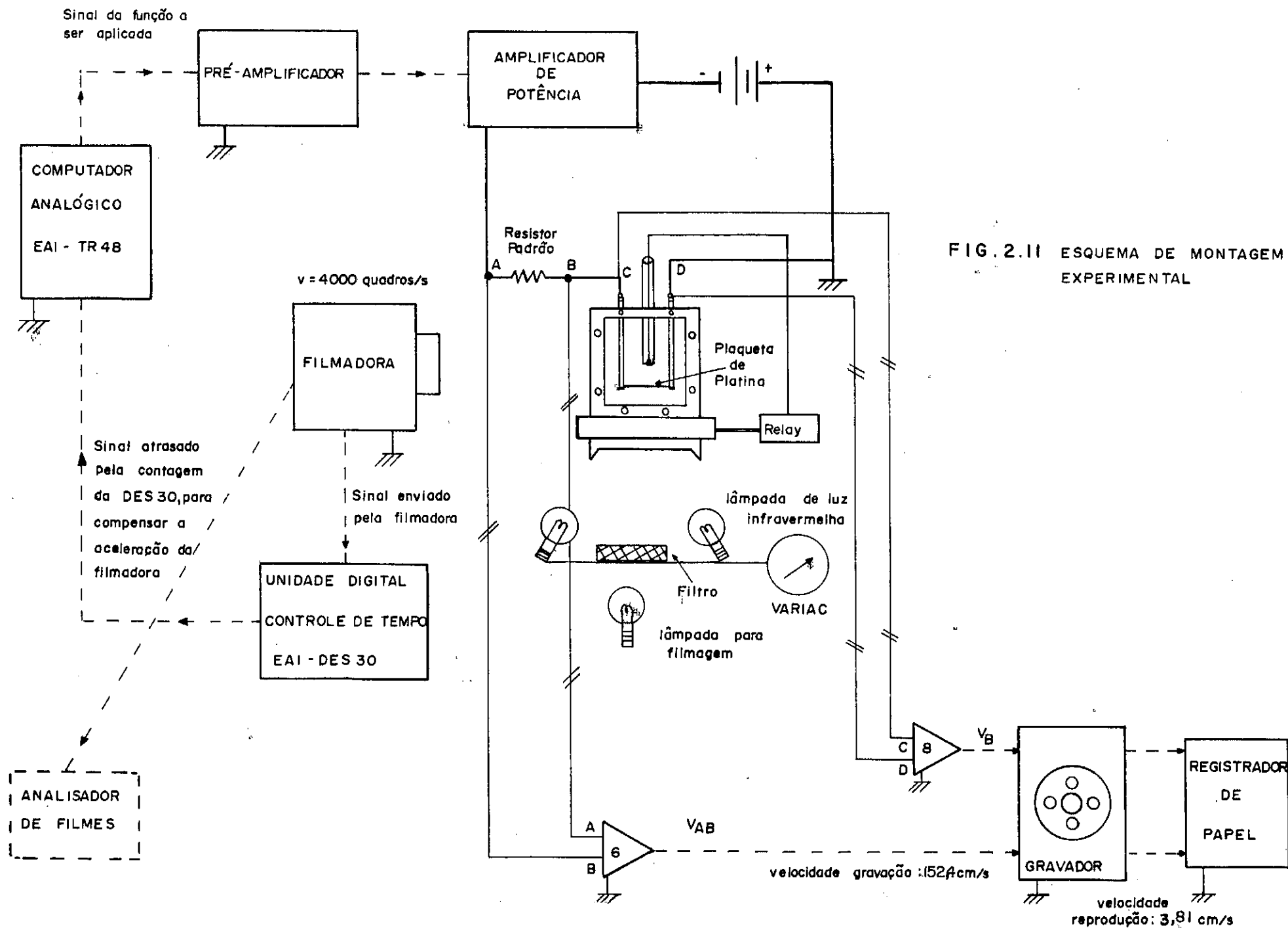


FIG. 2.11 ESQUEMA DE MONTAGEM EXPERIMENTAL

A corrente transitória que atravessa o sistema de ebulição (placa e padrão) é de alta amperagem. A potência liberada pela placa, que está imersa em água à temperatura de saturação, acarreta a transferência de calor da placa para o fluido sob os regimes de condução transiente e ebulição nucleada.

As tensões transientes nas extremidades da placa e do resistor padrão são amplificadas e registradas em gravador de dois canais.

Desta forma obtêm-se as medidas das tensões simultaneamente a filmagem das bolhas geradas na superfície da placa rapidamente aquecida. As tensões permitirão os cálculos diretamente das seguintes variáveis: potência gerada na placa, temperatura média da placa e fluxo de calor transmitido ao líquido.

Denominando R_p e $r(T_w)$ os valores das resistências do padrão e da placa, sendo esta última variável com a temperatura, tem-se para a corrente:

$$i(t) = \frac{V_{AB}(t)}{R_p} \quad ; \quad i(t) = \frac{V_B(t)}{r(T_w)} \quad .$$

Desta forma a potência gerada é:

$$P(t) = V_B(t) i(t) = \frac{1}{R_p} V_B(t) V_{AB}(t)$$

e a resistência da placa:

$$r(T_w) = R_p \frac{V_B(t)}{V_{AB}(t)} \quad .$$

Como é conhecida a curva de variação da resistência da placa de platina com a temperatura (Ver Apêndice 1).

$$r = r(T_w) = mT_w^2 + nT_w + p$$

e:

$$mT_w^2 + nT_w + p - R_p \frac{V_B(t)}{V_{AB}(t)} = 0$$

Conhecida a temperatura média da placa (T_w) em cada instante, o fluxo de calor transmitido ao líquido em contato com a placa será calculado por:

$$q = q_g(t) - H \frac{dT_w}{dt}$$

sendo considerada constante (H), a capacidade térmica da placa de platina.

2.5.2 - Medidas no Filme.

No tempo inicial de geração de potência, a unidade lógica DES-30 envia também um sinal amplificado à filmadora. O objetivo deste sinal é acender a lâmpada interna de marcação do filme durante a duração do pulso de geração (Veja Fig.2.8). Dessa forma é marcada no filme a duração da experiência realizada.

Para a análise do filme é necessária a determinação do intervalo de tempo decorrido entre um quadro e outro. Sendo N o número de quadros registrados num tempo de experimentação T' em segundos, tem-se:

$$\text{velocidade média do filme no intervalo } T' \quad \left(\frac{\text{quadros}}{s} \right) = \frac{N}{T'}$$

Conhecida a duração de um quadro, poderá ser feito o estudo do crescimento das bolhas com o tempo. Para isso o filme é observado no analisador de filmes e a partir daí são medidas as dimensões das bolhas. São considerados três diâmetros para as bolhas: horizontal (A), vertical (B) e de contato (C) entre bolha-placa.

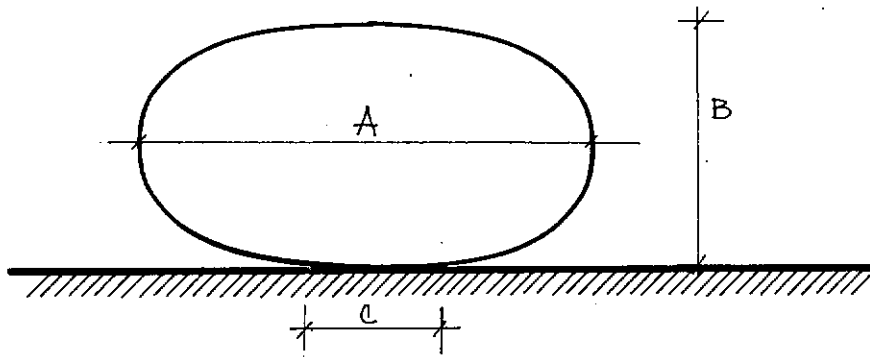


Fig. 2.12 - Dimensões para as Bolhas.

Considera-se a bolha gerada na superfície da placa como um oblata esferóide. Determina-se o raio (R) de uma esfera equivalente em volume ao oblata esferóide no instante considerado:

$$R = 0,5 \sqrt[3]{A^2 B}$$

Também a partir do filme determina-se em cada instante qual o número total de bolhas, $N_b(t)$, existentes na superfície da placa.

CAPÍTULO 3

MODELO TEÓRICO

3.1 - Introdução.

Para formulação do modelo teórico para ebulição nucleada heterogênea com geração transiente de energia, considera-se que uma plaqueta metálica, operando como um elemento resistivo, é aquecida pela passagem de uma corrente elétrica transiente. A placa está imersa em água à temperatura de saturação à pressão atmosférica. O fluxo de calor da placa para o líquido é dado pela expressão:

$$q = q_g - H \frac{dT_w}{dt} \quad (3-1)$$

sendo $q_g = q_i + \frac{q_o}{t_o} t$, a potência gerada na placa de duração (T') e $H \frac{dT_w}{dt}$ a taxa de calor absorvido pela placa acarretando o aumento de sua temperatura. Pode ser observado que somente existe fluxo de calor da placa para o líquido, quando a taxa de geração de calor for maior do que a taxa de absorção de calor pela placa. A taxa de absorção pelo líquido depende da sua difusividade térmica. Não ocorrendo absorção de calor pelo líquido saturado, toda potência gerada na placa será utilizada na elevação da temperatura desta.

Existindo o fluxo de calor (q), diferentes mecanismos de transferência de calor poderão ocorrer. Esses mecanismos são dependentes do tempo e dos níveis que venha alcançar a potência gerada. Dessa forma poderá ocorrer o superaquecimento do líquido saturado em contato com a superfície da placa, como também mudança de parte do líquido em vapor, ou até associação desses mecanismos de trocas térmicas.

Neste trabalho foi adotado experimentalmente para a potência gerada (q_g), os tempos de duração (T') e níveis de potências tais que permitissem o estudo da ebulição nucleada heterogênea.

3.2 - Descrição do Modelo.

Para os valores experimentais considerados de (q_g) e (T') , o mecanismo de transferência de calor da placa superaquecida para o líquido é de condução transiente, no intervalo de tempo entre o início da geração de potência e o surgimento da primeira bolha na superfície da placa. Hall (9), Tachibana (20), Johnson (10,11) concluem também a partir de dados experimentais que o mecanismo da condução transiente é o preponderante nos primeiros instantes de geração.

Quando o líquido se encontra inicialmente à temperatura de saturação (T_∞) e existindo um fluxo de calor $q = q_c(t)$ da placa para o líquido, forma-se uma película de líquido superaquecido por condução transiente na superfície da placa. Essa camada térmica tem espessura (δ) crescente com o tempo e é definida aqui até um valor limite para o qual o perfil de temperatura se iguala a

$$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_\infty} = 0,01.$$

Num tempo $t^* < T'$, o fluxo de calor da placa superaquecida para o líquido atinge valor tal que permite o aparecimento no seio da camada térmica, de uma pequena bolha de vapor. Assim no tempo t^* existe a identidade dos fluxos:

$$\rho\lambda\left(\frac{d\delta}{dt}\right)_{\theta=0,01} = q_b|_{t^*}$$

sendo:

- ρ : massa específica da água à temperatura de saturacão
- λ : calor latente de vaporização
- $q_b|_{t^*}$: fluxo de calor responsável pela formação da primeira bolha
- δ : espessura da camada limite térmica transiente.

Admite-se então, que a partir desse instante o fluxo de calor necessário para aumentar a espessura da camada limite térmica

provoque o aparecimento da primeira bolha na placa.

Com o surgimento de bolhas na superfície da placa, a camada térmica de condução transiente se mantém constante, alimentada pelo fluxo (q_c^*) e todo fluxo (q_b) fornecido além desse valor, será utilizado somente na geração das bolhas.

Observando-se os filmes das experiências realizadas, verificou-se que apenas o lado inferior da superfície da placa opera como formador de bolhas; no outro lado conseqüentemente só ocorre condução transiente de calor. Assim no intervalo $t^* \leq t \leq T'$ o mecanismo de transferência de calor existente, consiste na associação de condução transiente com ebulição nucleada heterogênea. Neste intervalo de tempo, o fluxo de calor da placa para o líquido referido a área total da superfície da placa será:

$$q = \frac{1}{2} (q_c + q_c^*) + q_b \quad (3-2)$$

3.3 - Região sem Ebulição.

Nessa região o mecanismo dominante de transferência de calor é o de condução transiente da placa para a água estagnada à temperatura de saturação. São adotadas as seguintes simplificações para esse modelo: a placa tem capacidade térmica finita porém não apresenta resistência térmica, o líquido é considerado como um sólido semi-infinito em contato com a placa e a distribuição de temperaturas no líquido é unidimensional e simétrica para ambos os lados da placa.

Em conformidade com as hipóteses adotadas, a equação da condução transiente de calor no líquido será:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3-3)$$

associada às condições inicial, de contorno e de balanço de energia

$$t = 0 \quad ; \quad T(x, 0) = T_{\infty} \quad (i)$$

$$x = 0 \quad ; \quad q_c(t) = q_g - H \frac{d}{dt} T(0, t) = -K \left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (ii)$$

$$x \rightarrow \infty \quad ; \quad T = T_{\infty} \quad (iii)$$

sendo: $q_g = q_i + \frac{q_o}{t_o} t$, a energia gerada na placa.

A Eq. (3-3) com as condições (i), (ii) e (iii) é resolvida no Ap.3 resultando para a temperatura da placa a expressão:

$$T_w(t) = T_{\infty} + \frac{q_o t_c^2}{H t_o} \left[\frac{4}{3\sqrt{\pi}} \tau^{3/2} - \tau + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \tau^{1/2} - 1 + e^{\tau} \operatorname{erfc} \sqrt{\tau} \right] +$$

$$+ \frac{q_i t_c}{H} \left[e^{\tau} \operatorname{erfc} \sqrt{\tau} - 1 + \frac{2\tau^{1/2}}{\sqrt{\pi}} \right] \quad (3-7)$$

e para o fluxo de calor por condução transiente:

$$q_c = q_c(t) = \frac{q_o t_c}{t_o} \left[\tau - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \tau^{1/2} + 1 - e^{\tau} \operatorname{erfc} \sqrt{\tau} \right] + q_i \left[1 - e^{\tau} \operatorname{erfc} \sqrt{\tau} \right] \quad (3-8)$$

onde: a : difusividade térmica da água a temperatura de saturação

H : capacidade térmica da placa por unidade de área

K : condutividade térmica da água

$\tau = t/t_c$: tempo adimensional

$t_c = \frac{aH^2}{K^2}$: constante de tempo função das propriedades físicas do metal e água.

3.4 - Região com Ebulição.

3.4.1 - Taxa de Calor Absorvido no Sistema para Geração e Crescimento de Bolhas.

A plaqueta na ação de gerar bolhas é considerada um sistema linear fechado admitindo concentração espacial uniforme de bolhas. Admite-se também que o sistema seja macroscopicamente segregado, isto é, cada bolha cresce independentemente das outras, não havendo coalescência e o campo de temperaturas no líquido ao redor de uma bolha não é afetado pelo crescimento de outra. Portanto cada bolha cresce como se estivesse isolada em seu próprio ambiente.

Com a finalidade de descrever a taxa de crescimento de todas as bolhas originadas em diferentes tempos na placa, pode-se fazer uso de uma função distribuição de tempos de residência na placa, ou seja, tempos em que a bolha cresce presa à placa as custas do calor transferido ao líquido, tendo sido originada num dado tempo t_{oi} .

Considera-se, então, que as bolhas estão uniformemente distribuídas espacialmente na placa e com uma frequência de distribuição de tempos de residência exponencialmente decrescente, do tipo:

$$f(t, t_{oi}) = \frac{e}{T'} - \frac{(t - t_{oi})}{T'} = \frac{1}{T'} \frac{N_b(t, t_{oi})}{N_b(t)}$$

onde $f(t, t_{oi})$ representa a fração de bolhas existentes num tempo t e que se originaram no tempo t_{oi} , por unidade de tempo.

Como consequência de uma distribuição espacial uniforme na superfície da placa, a fração de bolhas num dado instante t que crescem presas à placa é igual à fração de bolhas no mesmo tempo que deixam a placa, todas originárias no mesmo instante t_{oi} . Também:

$$\int_0^{t+\infty} \frac{e}{T'} - \frac{(t - t_{oi})}{T'} dt_{oi} = 1$$

Assim para se calcular em dado instante t , o número de bolhas na superfície da placa que iniciaram seu crescimento em t_{oi} , basta multiplicar a função frequência de distribuição pelo número total de bolhas naquele instante, $N_b(t)$:

$$N_b(t, t_{oi}) = T' N_b(t) f(t, t_{oi}) \quad .$$

Informações sobre $N_b(t)$ devem ser obtidas de alguma forma. Considerações teóricas devem incluir modelos estatísticos de probabilidades referentes a ocorrência com o tempo, de nucleações na superfície da placa. O modelo aqui apresentado utilizará $N_b(t)$ obtido de dados experimentais. Levando em consideração que o modelo para a placa é de um sistema fechado e que a sua superfície é finita, haverá portanto saturação com um número finito de bolhas completamente segregadas após um longo tempo do processo:

$$\frac{N_b(t)}{N_o} = 1 - e^{-kt} \quad .$$

Portanto uma expressão análoga à resposta de um sistema uniforme fechado quanto à geração contínua de bolhas na entrada do sistema. Os valores dos parâmetros N_o e k serão determinados experimentalmente e $N_b(t)$ é o número total de bolhas presentes naquele instante t considerando, portanto, o despreendimento de bolhas na placa com o decorrer do tempo. Assim, evita-se uma distribuição de condições de contorno para cada bolha que sai da plaqueta.

A cada bolha que nucleou na superfície da placa em t_{oi} , e que cresce presa a ela em t , está associada uma taxa de crescimento dada por:

$$\frac{dV}{dt}(t, t_{oi}) \quad .$$

O modelo admite que o tempo de crescimento de uma bolha é muito pequeno, comparado com o período transiente de aquecimento da placa, de modo que o fenômeno é "quasi-steady-state" e pode ser usada

da a expressão de uso generalizado da dependência do raio da bolha com a raiz quadrada do tempo:

$$R(t, t_{oi}) = 2\beta \left[a(t - t_{oi}) \right]^{1/2} ;$$

A experiência confirma essa hipótese e mostra, como usado por outros autores em modelos com geração transiente de calor, Akiyama (1), Johnson (11), Yiesin (24), que β é independente do tempo. O exato mecanismo que explica esses resultados ainda não foi elucidado e se espera uma solução.

Agora, pode ser escrita a expressão para o fluxo de calor na placa, devido à nucleação e crescimento de bolhas em sua superfície:

$$q_b = \rho_v \lambda \frac{N_b(t)}{S_p} \frac{d\bar{V}}{dt}(t) ,$$

baseado na área total de ambos os lados da placa, superior e inferior, a que se refere $N_b(t)$, sendo:

$$\frac{d\bar{V}}{dt}(t) = \int_0^t f(t, t_{oi}) \frac{dV}{dt}(t, t_{oi}) dt_{oi} ;$$

Substituindo as expressões correspondentes e integrando, obtêm-se:

$$q_b = 16\pi a^{3/2} \beta^3 \frac{\rho_v \lambda}{S_p} N_b(t) \left[\frac{1}{2} \sqrt{\pi T'} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{t}{T'}} - \sqrt{t} e^{-t/T'} \right] \quad (3-9)$$

Nesta expressão a constante (β) de crescimento de bolhas tem influência sensível. Alterações dos valores de (β) da ordem de $\pm 5\%$ acarretam variações de $\pm 16\%$ em (q_b). Também pode ser ainda observado nessa expressão que existe uma relação direta entre (q_b) e o número de bolhas geradas na placa (N_b).

3.4.2 - Temperatura da placa.

No instante t dentro do intervalo de tempo $t^* \leq t \leq T'$, o fluxo de calor transmitido pela placa é absorvido pelo líquido, sob forma de geração de bolhas e aumento de temperatura por condução transiente. Assim:

$$q_g - H \frac{dT_w(t)}{dt} = q_b + \frac{1}{2} (q_c + q_c^*)$$

Explicitando a expressão para a temperatura da placa:

$$T_w(t) = T_w(t^*) + \frac{1}{H} \left[\int_{t^*}^t q_g dt - \int_{t^*}^t q_b dt - \frac{1}{2} \int_{t^*}^t (q_c + q_c^*) dt \right]$$

Os integrandos são funções já definidas nos § 3.2 e 3.3. Desta forma substituindo as expressões correspondentes e integrando, obtêm-se:

$$\begin{aligned} T_w(t) = & T_\infty + \frac{q_o t_c^2}{H t_o} \left[\frac{4}{3\sqrt{\pi}} (t^*/t_c)^{3/2} - (t^*/t_c) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t^*}{t_c}} - 1 + e^{t^*/t_c} \operatorname{erfc} \sqrt{t^*/t_c} \right] + \\ & + \frac{q_i t_c}{H} \left[e^{t^*/t_c} \operatorname{erfc} \sqrt{t^*/t_c} - 1 + \frac{2(t^*/t_c)^{1/2}}{\sqrt{\pi}} \right] + \\ & + \frac{1}{H} \left[q_i t + \frac{q_o}{2t_o} t^2 \right]_{t^*}^t + \\ & - \frac{1}{2H} \sqrt{\pi T'} \left[t \operatorname{erf} \sqrt{\frac{t}{T'}} + \frac{T'}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{T'}} e^{-t/T'} - \frac{T'}{2} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{t}{T'}} \right]_{t^*}^t + \\ & - \frac{1}{H} \left[-\frac{T'}{2} \sqrt{\pi T'} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{t}{T'}} + T' \sqrt{t} e^{-t/T'} \right]_{t^*}^t + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2H} \sqrt{\pi T'} \left[\frac{1}{k\sqrt{1 + kT'}} \operatorname{erf} \sqrt{t(k + 1/T')} - \frac{1}{k} e^{-kt} \operatorname{erf} \sqrt{t/T'} \right]_{t^*}^t + \\
& - \frac{1}{H(k + \frac{1}{T'})} \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{k + 1/T'}} \operatorname{erf} \sqrt{t(k + 1/T')} - \sqrt{t} e^{-t(k + 1/T')} \right]_{t^*}^t + \\
& - \frac{1}{2H} q_c^* (t - t^*) - \frac{q_o t_c}{2H t_o} \left[t \left(\frac{t}{2t_c} + 1 \right) - \frac{1}{\sqrt{\pi t t_c}} \right]_{t^*}^t + \\
& + \frac{q_o t_c^2}{2H t_o} \left[e^{t/t_c} \operatorname{erfc} \sqrt{t/t_c} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t/t_c} \right]_{t^*}^t + \\
& - \frac{q_i t_c}{2H} \left[\frac{t}{t_c} - e^{t/t_c} \operatorname{erfc} \sqrt{t/t_c} - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t/t_c} \right]_{t^*}^t
\end{aligned} \tag{3-10}$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Resultados Experimentais.

O comportamento dinâmico da transferência de calor em placa plana por ebulição nucleada com geração transiente de potência em rampa, é mostrado nas Figs. 4.1 a 4.6. A temperatura média da placa (T_w) e a potência gerada na placa (q_g) estão representadas nessas figuras de maneira adimensional e em função do tempo adimensional de geração (τ).

As Figs. 4.7 e 4.8 contêm parte das séries de quadros dos filmes do crescimento de bolhas na placa, obtidos com filmadora de alta velocidade. Nessas figuras pode-se observar a ocorrência de coalescência de bolhas na placa após determinado tempo de geração de potência e a influência da declividade da rampa na quantidade de bolhas geradas. Nota-se ainda que apenas o lado inferior da superfície da placa opera como formador de bolhas. Tal fato só pode ser explicado pela existência de centros ativos de nucleação preferenciais no lado inferior da placa, já que o único tratamento dado à placa antes de cada experiência foi uma limpeza com oxidante (mistura sulfocrômica).

O campo de filmagem não compreende toda a superfície da placa, de maneira que algumas bolhas não são filmadas e outras têm somente alguma região aparecendo no filme. Em vista disso é feita uma correção linear para a quantidade de bolhas na placa observada no filme, levando em conta a superfície total da placa.

As histórias do crescimento de bolhas na placa, para duas rampas distintas, estão indicadas nas Figs. 4.9 e 4.10. Pode ser notada a relação linear com o tempo dos quadrados dos raios das bolhas. As inclinações dessas retas aumentam nos primeiros tempos iniciais de geração, permanecendo depois constantes. Isso possivelmente se deve a influência do campo de temperatura de uma bolha em

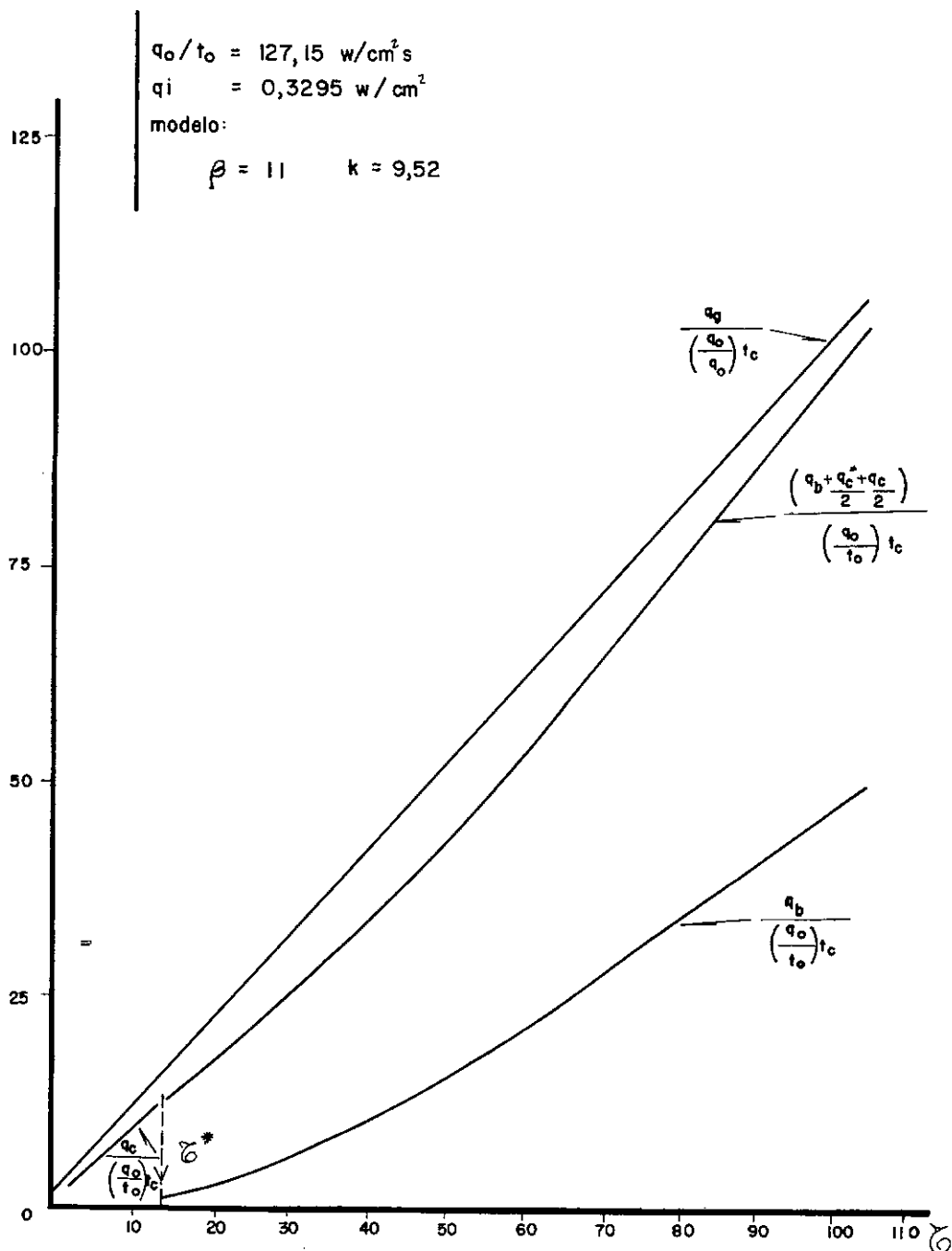


FIG. 4.1 POTÊNCIA GERADA NA PLACA E FLUXO DE CALOR DETERMINADO PELO MODELO

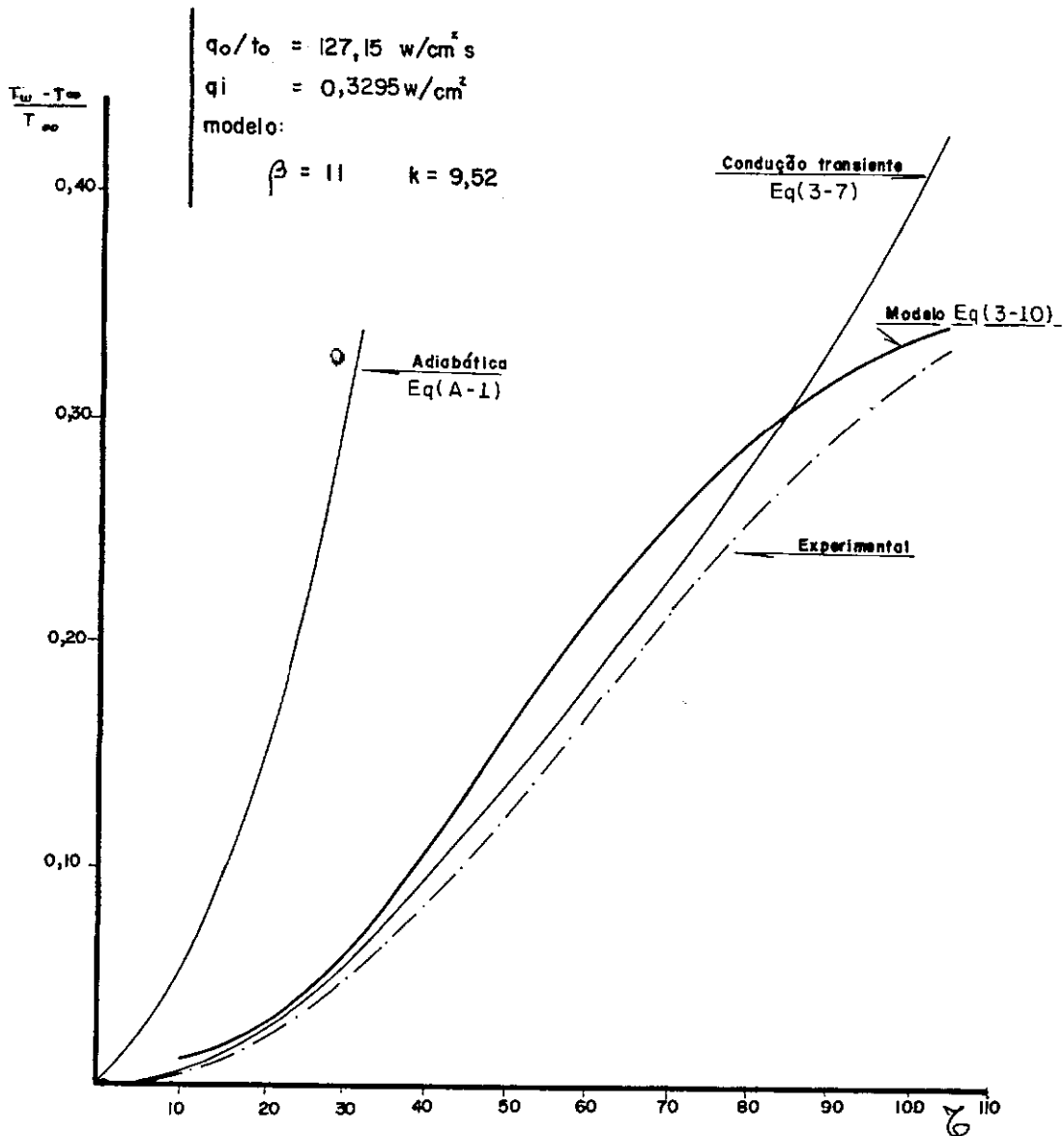


FIG. 4.2 PERFIS DE TEMPERATURA PARA VÁRIAS IDEALIZAÇÕES DE OPERAÇÃO TRANSIENTE

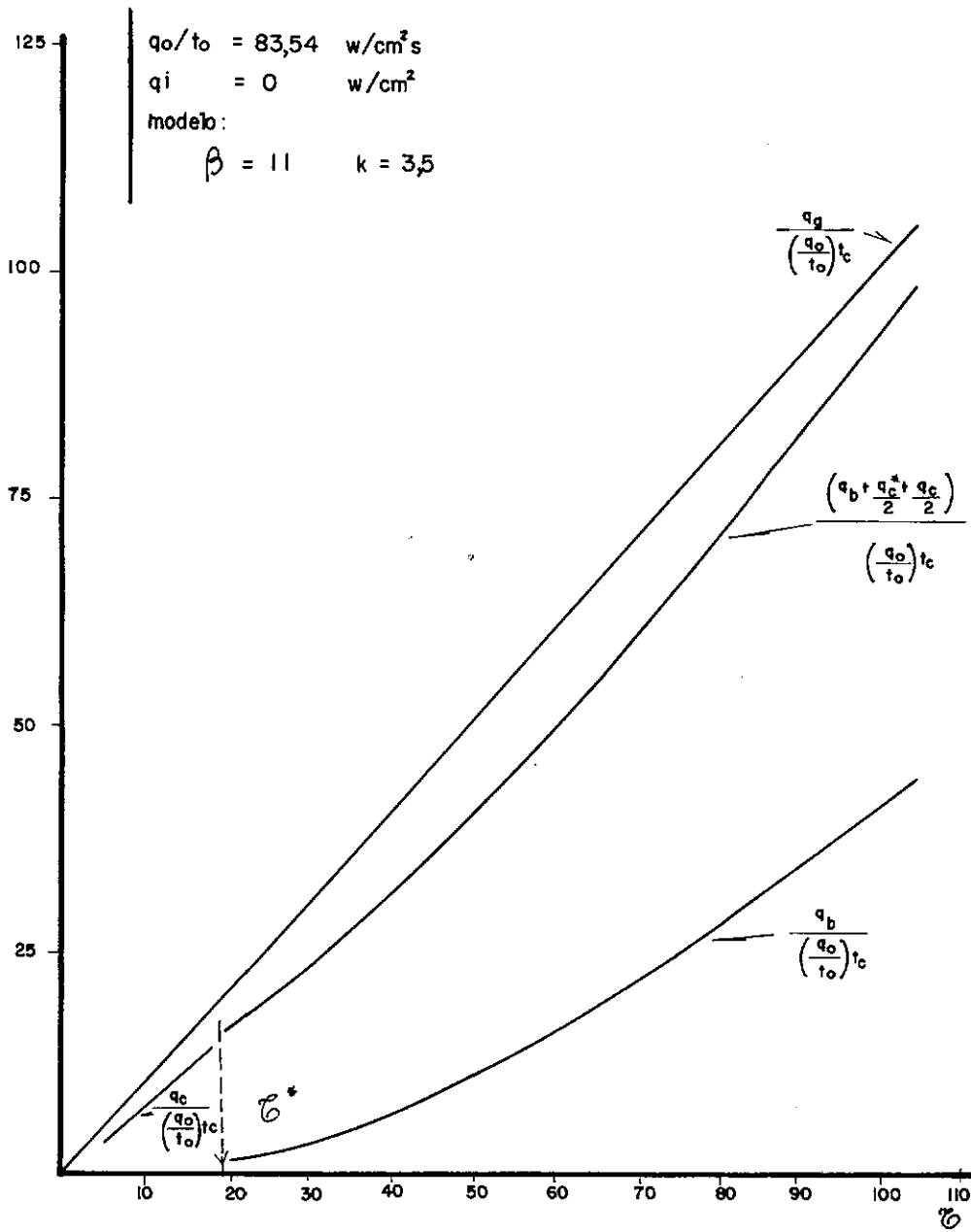


FIG. 4.3 POTÊNCIA GERADA NA PLACA E FLUXO DE CALOR DE TÉRMINADO PELO MODELO

$$q_0 / t_0 = 83,54 \text{ w/cm}^2 \text{ s}$$

$$q_i = 0 \text{ w/cm}^2$$

modelo

$$\theta = 11 \quad k = 3,5$$

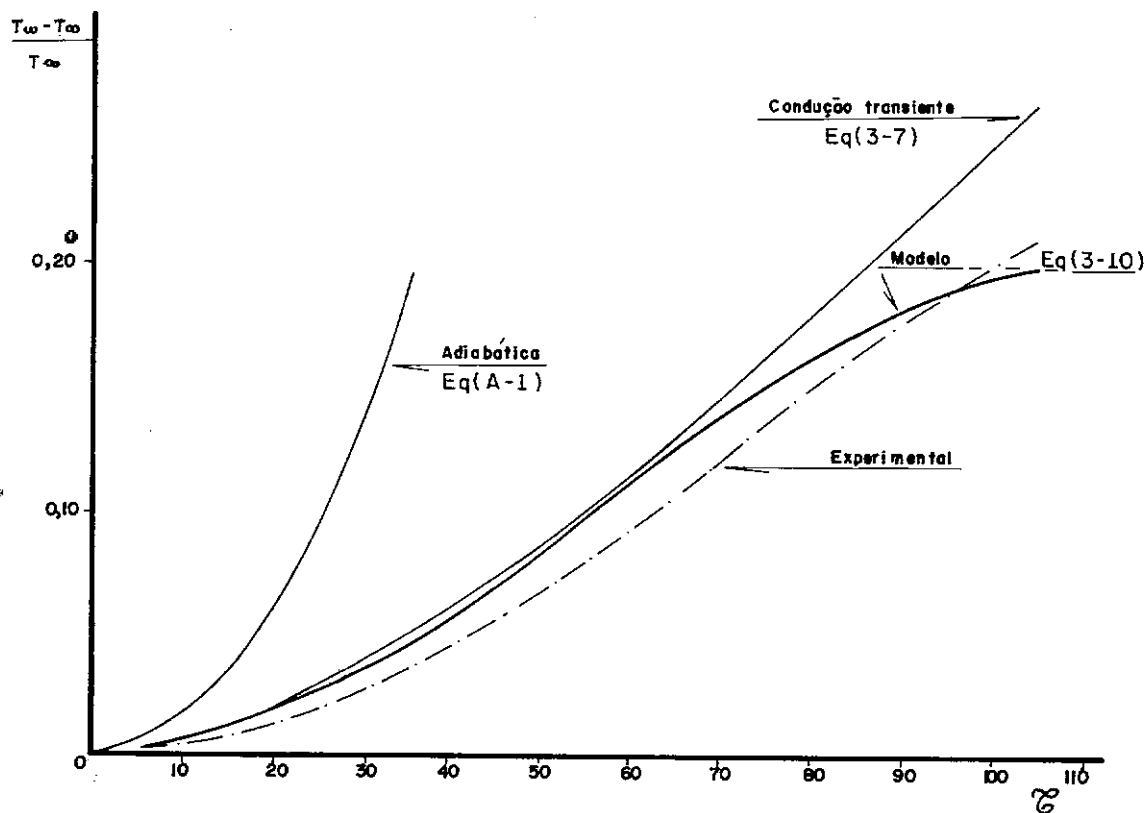


FIG. 4.4 PERFIS DE TEMPERATURA PARA VÁRIAS IDEALIZAÇÕES DE OPERAÇÃO TRANSIENTE

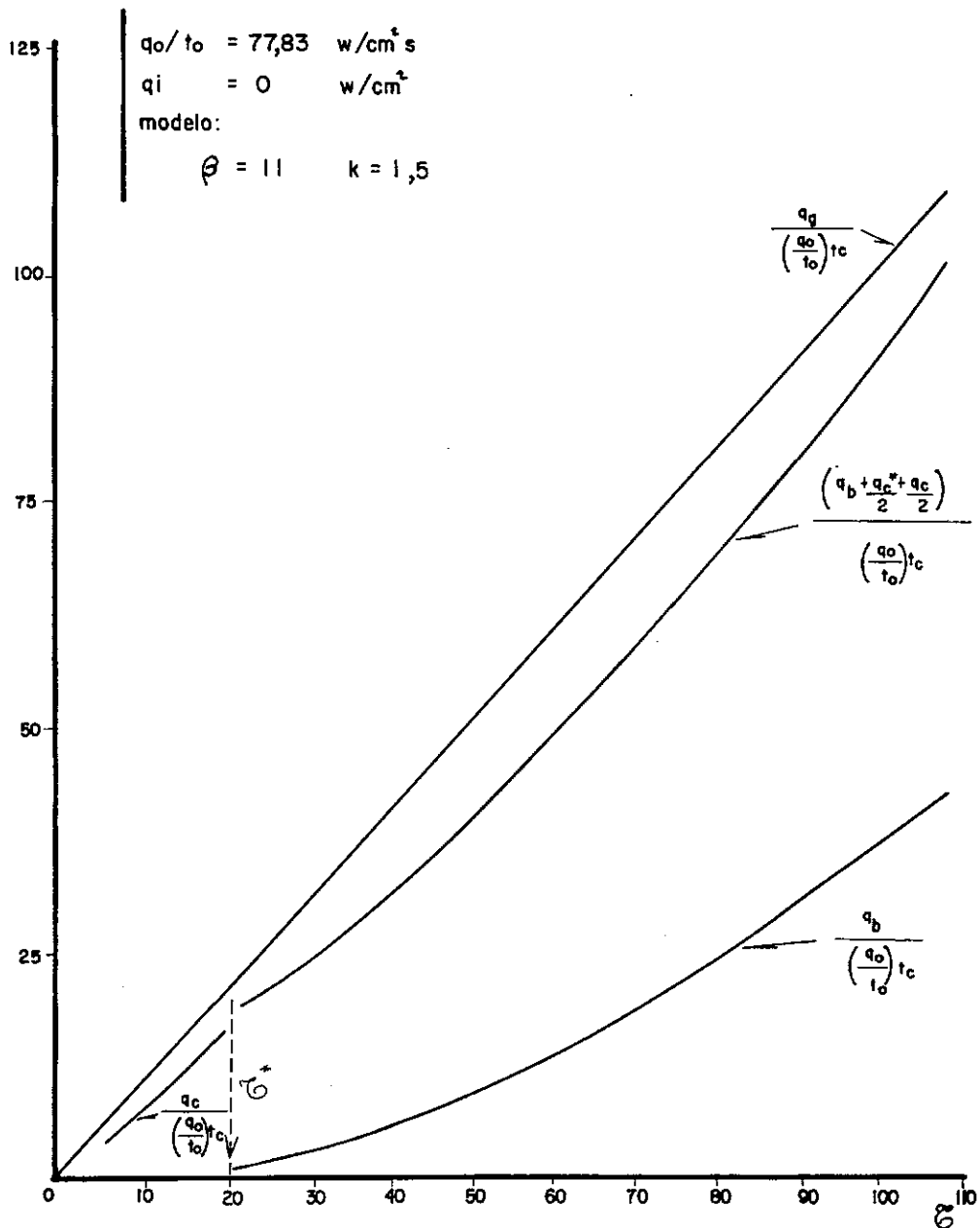


FIG. 4.5 POTÊNCIA GERADA NA PLACA E FLUXO DE CALOR DETERMINADO PELO MODELO

$$q_o / t_o = 77,83 \quad \text{w/cm}^2 \text{ s}$$

$$q_i = 0 \quad \text{w/cm}^2$$

modelo:

$$\beta = 11 \quad k = 1,5$$

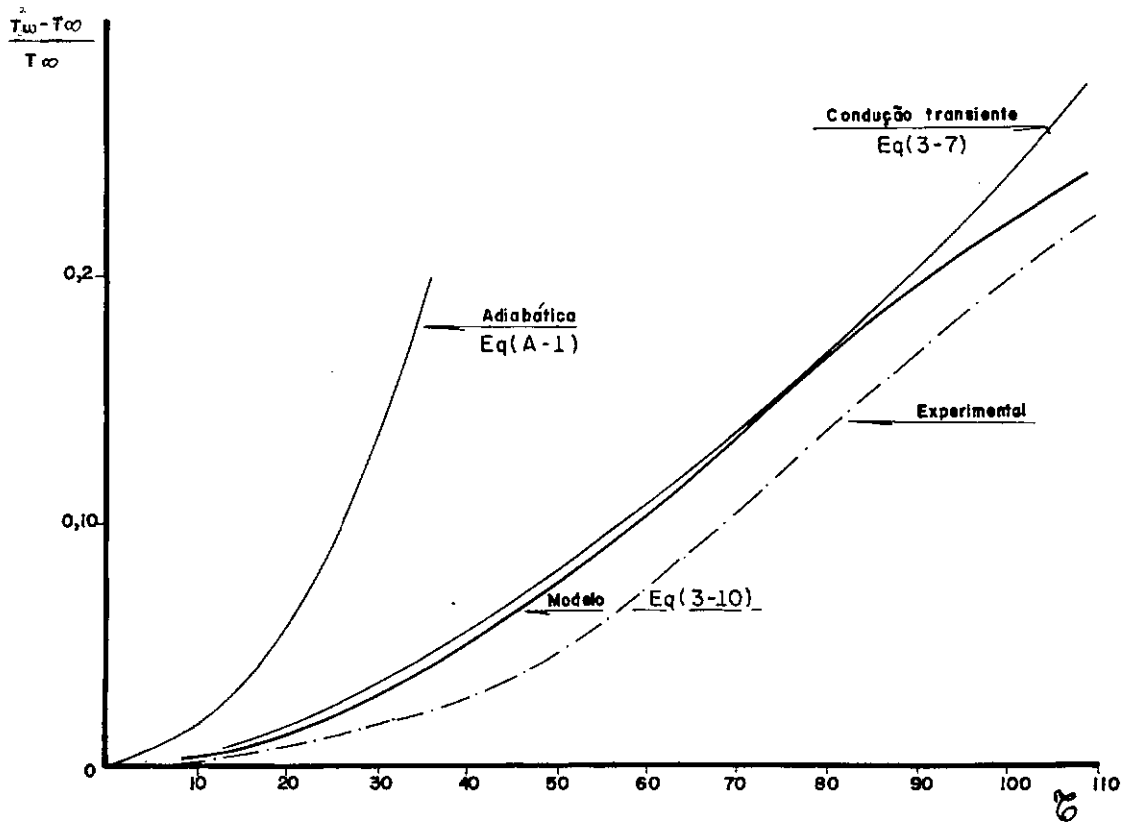


FIG. 4.6 PERFIS DE TEMPERATURA PARA VÁRIAS IDEALIZAÇÕES DE OPERAÇÃO TRANSIENTE

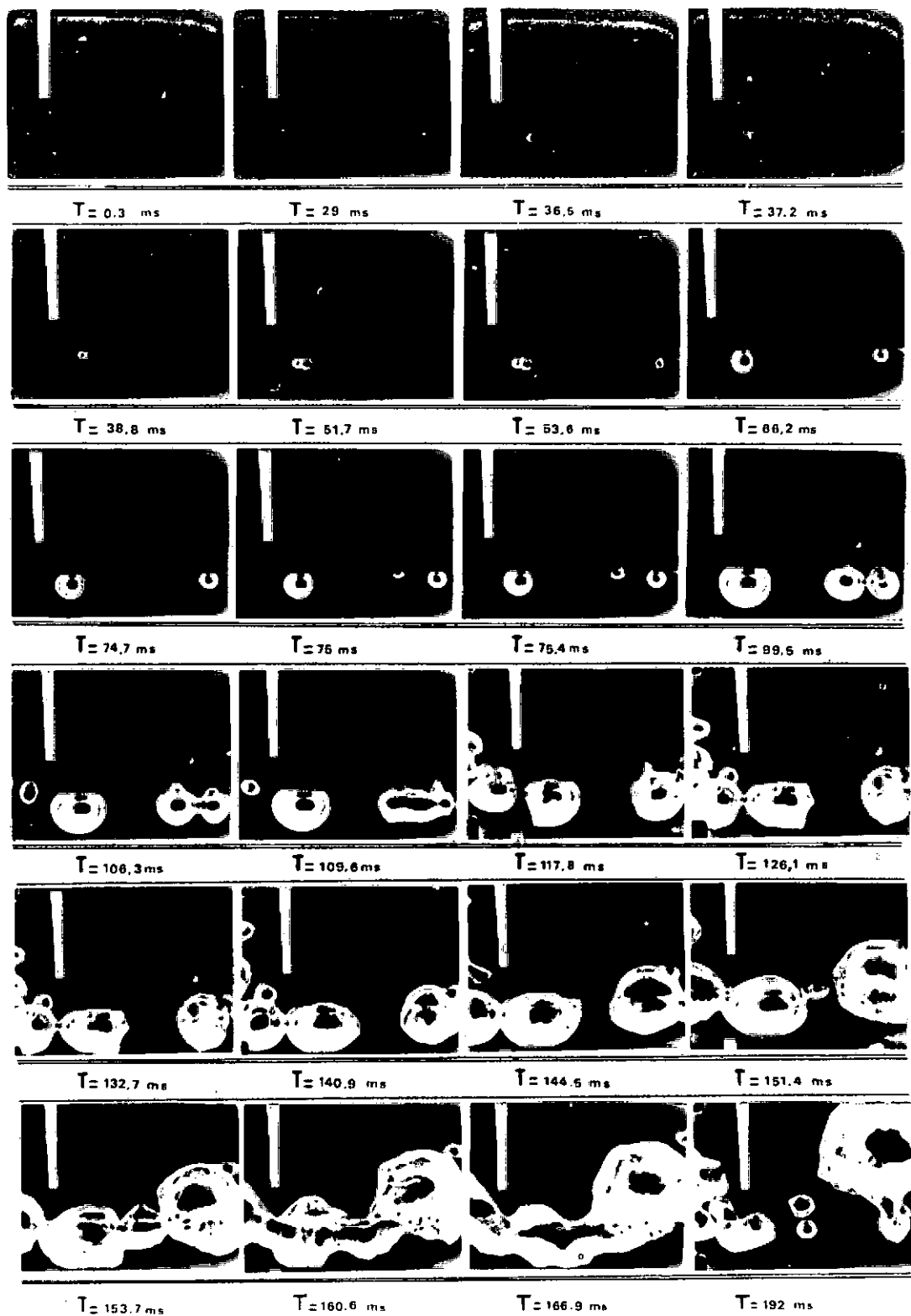


FIG. 4.7 ASPECTOS DAS BOLHAS GERADAS
NA SUPERFICIE DA PLACA

$q_0/t_0 = 127.15 \text{ w/cm}^2$
 $q_1 = 63295 \text{ w/cm}^2$
 $T_\infty = 100^\circ\text{C}$ $T' = 191.25 \text{ ms}$

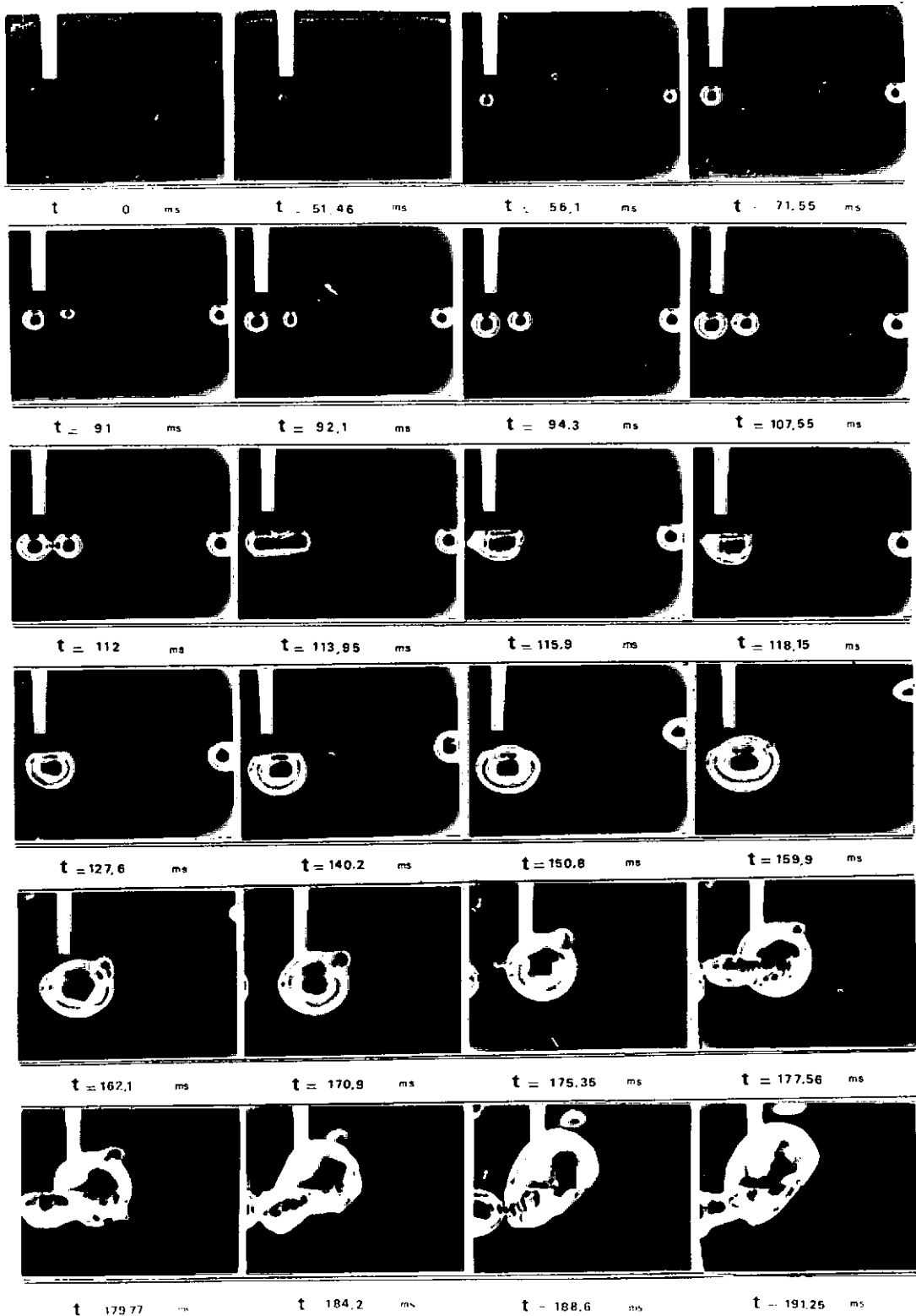


FIG. 48 ASPECTOS DAS BOLHAS GERADAS
NA SUPERFICIE DA PLACA

$$q_0/t_0 = 83.54 \text{ w cm}^2\text{s}$$

$$q_1 = 0 \text{ w cm}^2$$

$$T_\infty = 100^\circ\text{C} \quad T' = 191.25 \text{ ms}$$

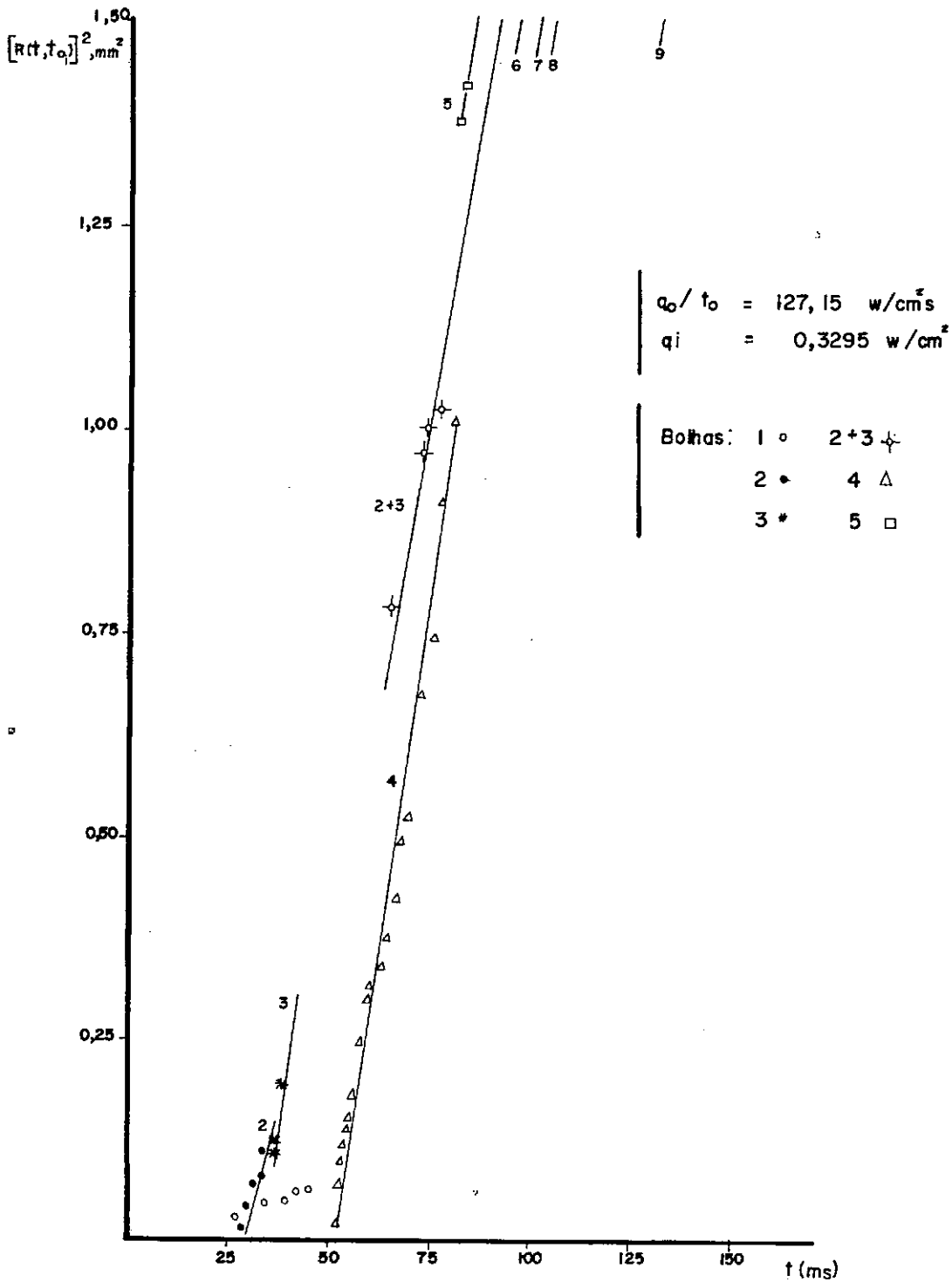


FIG. 4.9 HISTÓRIA DO CRESCIMENTO DE BOLHAS NA PLACA

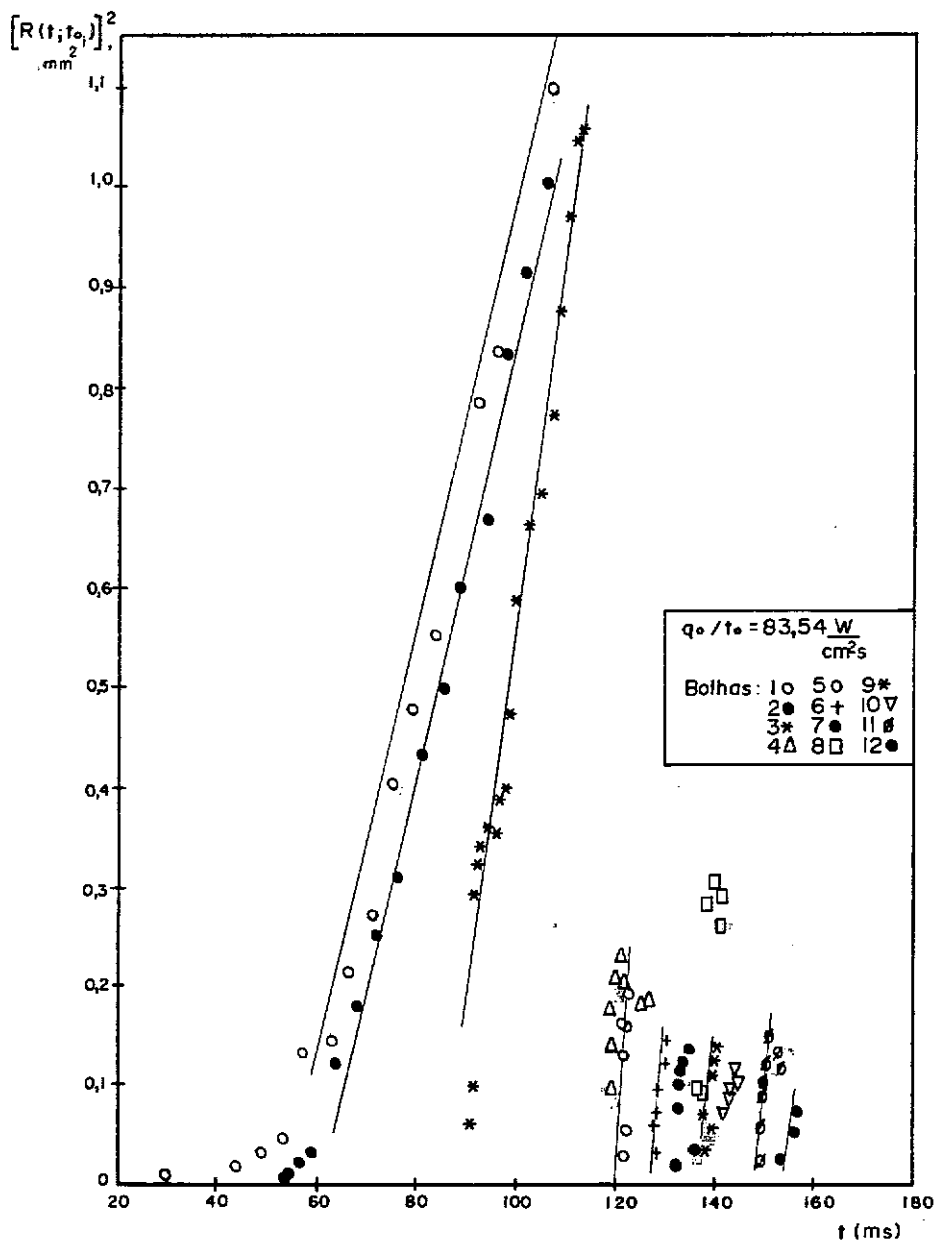


FIG. 4.10 - História do crescimento de bolhas na placa

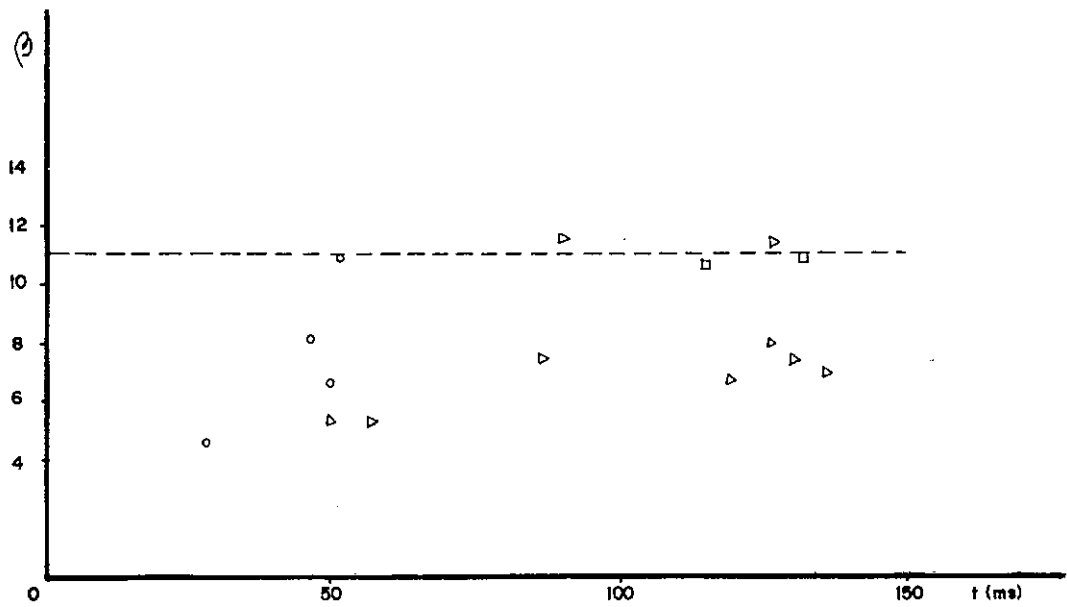
crescimento sobre os campos de temperaturas de outras bolhas. Uma outra explicação seria o fato de que após certo tempo de geração, o diâmetro da bolha é bem maior do que a espessura da camada limite térmica e a área de troca de calor em relação a área total da bolha é proporcionalmente reduzida.

Na Fig. 4.11 estão representadas as constantes de crescimento (β) para as bolhas que crescem na superfície da placa, essa constante se encontra definida no § 3.3.

4.2 - Região sem Ebulição.

Após ter sido iniciada a geração de potência na placa, durante certo intervalo de tempo, nenhuma bolha surge na sua superfície. O mecanismo de transferência de calor então dominante é o de condução transiente de calor da placa para a água em estagnação e as soluções das equações da condução unidimensional e transiente obtidas no § 3.2, estão apresentadas nas Figs. 4.1 a 4.6. Observa-se nas Figs. 4.2, 4.4 e 4.6 que na região em que a ebulição não ocorre, o perfil teórico de temperatura concorda bem com aquele de terminado experimentalmente. Encontra-se ainda nessas figuras a curva hipotética de temperatura adiabática, que compreende as temperaturas da placa caso todo calor gerado fosse utilizado na elevação de sua temperatura. Isto poderá ocorrer quando o tempo de geração de energia for muito menor do que o tempo necessário à absorção de calor pelo líquido.

Na Fig. 4.12 está representada a espessura da camada térmica no líquido segundo a equação da condução transiente, Eq. (3-4), para os níveis de geração de potência utilizados. Adotou-se como valor limite para a camada térmica, a curva de $\theta = \frac{T_W - T_\infty}{T_\infty} = 0,01$. Pode ser também observada nessa figura a variação com o tempo da espessura da camada limite térmica se o perfil de temperatura for considerado linear.



$$\left| \begin{array}{l} q_0/t_0 = 127,15 \frac{w}{cm^2 s} \\ q_i = 0,3295 \frac{w}{cm^2} \end{array} \right|$$

O

Q

$$\left| \begin{array}{l} q_0/t_0 = 83,54 \frac{w}{cm^2 s} \\ q_i = 0 \frac{w}{cm^2} \end{array} \right|$$

△

$$\left| \begin{array}{l} q_0/t_0 = 77,83 \frac{w}{cm^2 s} \\ q_i = 0 \frac{w}{cm^2} \end{array} \right|$$

□

FIG. 4.11 CONSTATNE DE CRESCIMENTO β

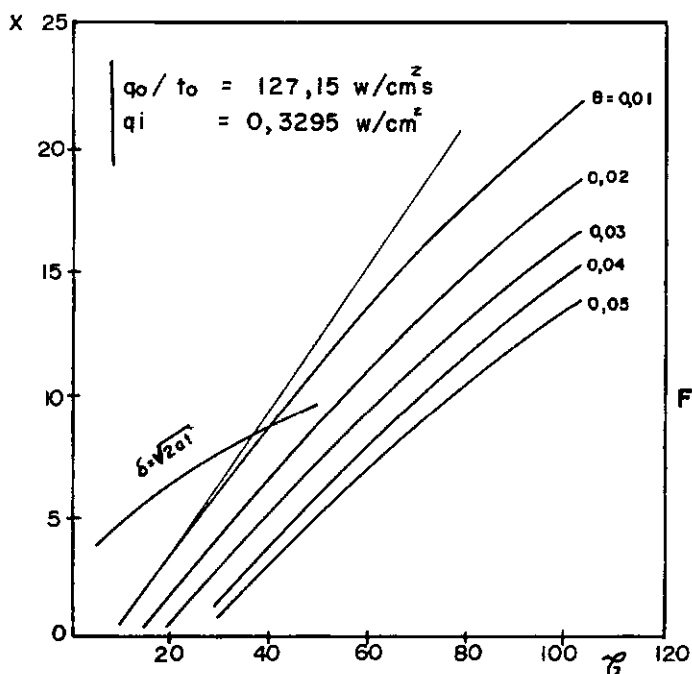
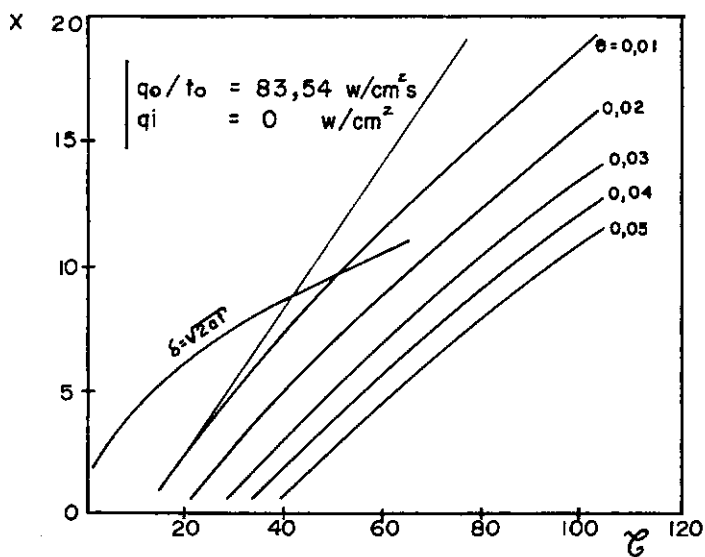
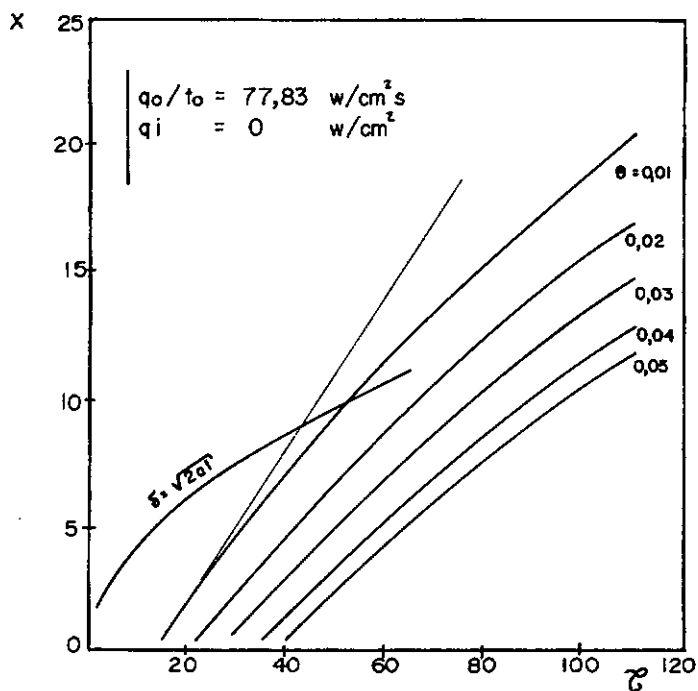


FIG 4.12 - Espessura da Camada Limite Térmica segundo a Equação da Condução.

4.3 - Região de Ebulição Nucleada.

Com o aumento da potência gerada, a temperatura da superfície da placa atinge determinado nível e as bolhas começam a aparecer nessa superfície de aquecimento. Quando isso ocorre a temperatura começa a se desviar gradualmente da curva baseada nas equações da condução pura, veja Figs. 4.1 a 4.6. Nessas figuras são encontradas as curvas do modelo teórico desenvolvido no Cap. 3 para explicação do regime de ebulição nucleada. Nota-se a concordância entre as curvas de temperatura do modelo e a experimental.

Nas Figs. 4.2, 4.4 e 4.6 pode ser observado um ponto de inflexão nas curvas do modelo para a temperatura da placa em função do tempo de geração. A existência desse ponto de inflexão indica que a temperatura da placa tende a atingir um valor máximo de saturação. Esse comportamento era de certa forma esperado, já que o modelo admite uma saturação do número de bolhas na superfície da placa.

Com a finalidade de ser utilizada no modelo teórico proposto, foi determinada a partir dos filmes, a variação do número de bolhas na superfície da placa, com o tempo de geração de potência.

Utilizando-se a ajustagem pelo método dos mínimos quadrados, e uma variação da forma $N_b = N_0(1 - e^{-kt})$, foram obtidos os parâmetros (N_0) e (k), sendo (N_0) o número máximo de bolhas na superfície da placa. Para as rampas empregadas nos experimentos, os valores de (k) estão indicados nas Figs. 4.1 a 4.6.

Dentre os filmes analisados para registro de dados, foi escolhido aquele que fornecesse maior número de bolhas. Esse filme correspondeu a uma geração de potência 20% maior do que a rampa da Fig. 4.1 e de mesma duração, sendo obtido para o número de saturação de bolhas na placa, o valor ($N_0 = 16$).

No modelo teórico foi empregado o valor ($\beta = 11$) para a

constante de crescimento das bolhas na superfície da placa, nos três casos de rampa utilizados. Esse valor foi retirado da Fig. 4.11. Os valores da constante (β) dessa figura não concordam com os valores correspondentes fornecidos pela teoria assintótica de Scriven (17, 18). Embora largamente utilizada, essa teoria é baseada na nucleação em meio homogêneo e existem críticas quanto sua aplicação a meio heterogêneo, como a feita por Cole-Shulman (4) quando pesquisaram ebulição nucleada por geração de potência em regime permanente.

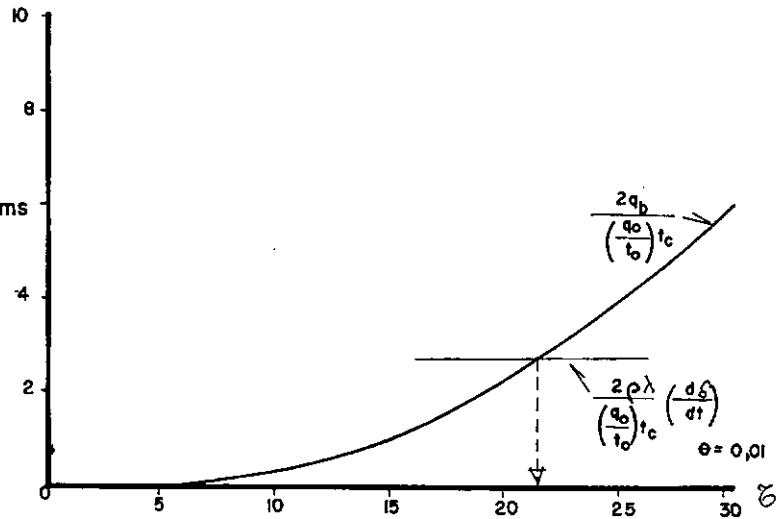
O tempo de aparecimento da primeira bolha na superfície da placa pode ser determinado a partir do filme, Figs. 4.7 e 4.8 ou pela teoria desenvolvida no § 3.2. A determinação gráfica do tempo inicial de formação de bolhas na placa e a comparação desse tempo com aquele determinado pelo filme estão indicadas na Fig. 4.13, para as três rampas de geração de potência utilizadas nas experiências. Esse tempo é obtido pela interseção das curva de fluxo de calor gerador de bolhas (q_b) e pela curva resultante das taxas de crescimento da camada limite térmica correspondente a condução transiente. No período inicial de geração de potência esta última curva pode ser aproximada por uma reta cuja inclinação está mostrada na Fig. 4.12.

$$q_0/t_0 = 77,83 \frac{W}{cm^2s}$$

$$\tau^* = 21,4 \quad t^* = 39,16 \text{ ms}$$

$$t_{exp}^* = 38,79 \text{ ms}$$

$$\beta = 11 \quad k = 1,50$$

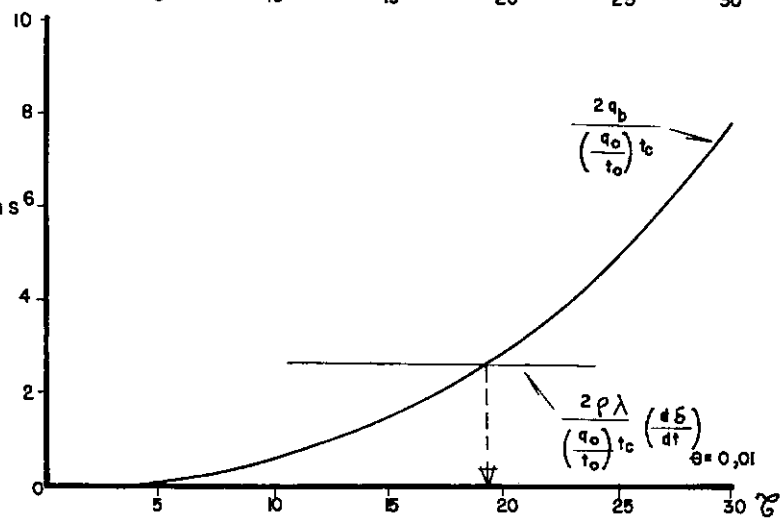


$$q_0/t_0 = 83,54 \frac{W}{cm^2s}$$

$$\tau^* = 19,2 \quad t^* = 35,4 \text{ ms}$$

$$t_{exp}^* = 37,5 \text{ ms}$$

$$\beta = 11 \quad k = 3,50$$



$$q_0/t_0 = 127,15 \frac{W}{cm^2s}$$

$$\tau^* = 14,2 \quad t^* = 26 \text{ ms}$$

$$t_{exp}^* = 27,65 \text{ ms}$$

$$\beta = 11 \quad k = 9,52$$

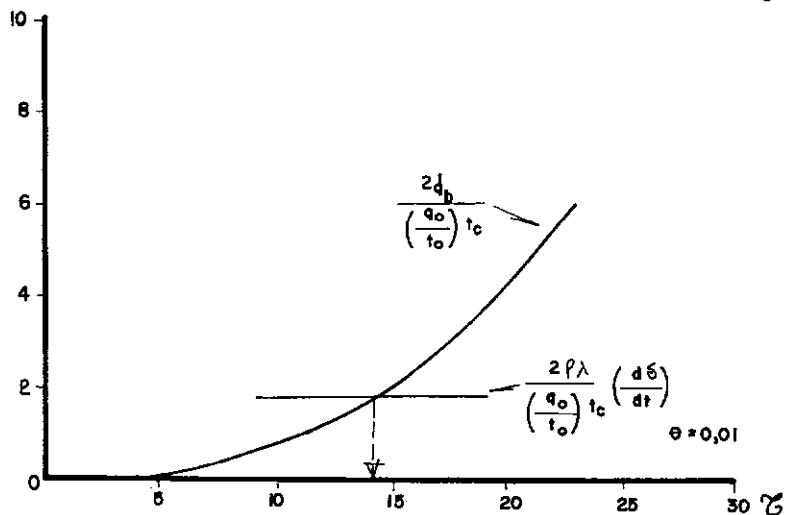


FIG.4.13 DETERMINAÇÃO GRÁFICA DO TEMPO INICIAL DE FORMAÇÃO DE BOLHAS NA PLACA

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Os resultados experimentais indicam, que o modelo idealizado neste trabalho pode ser utilizado na previsão do comportamento de um sistema, constituído de placa plana mergulhada em água a temperatura de saturação, com geração de potência transiente em rampa.

A utilização simultânea da filmagem das bolhas formadas na superfície da placa e do registro das tensões elétricas transientes nas extremidades da placa e do resistor padrão, tornou possível a obtenção de uma série de dados indispensáveis a construção do modelo matemático. A precisão das medidas elétricas obtidas e o sincronismo destas medidas com a filmagem, foram conseguidos em decorrência dos sistemas de geração e controle de potência adotados, ficando evidenciada a aplicabilidade do computador híbrido EAI-TR48, DES-30 em processos transientes de geração de potência em ebulição nucleada não homogênea...

O sistema de iluminação utilizado na filmagem resultou na boa nitidez da silhueta de cada bolha e do perfil da placa, tornando precisas as medidas das dimensões da bolha durante o período de aderência à placa.

A partir das experiências realizadas verificou-se, que no regime de ebulição nucleada existe para cada bolha que se forma na superfície da placa, a dependência linear do raio da bolha com a raiz quadrada da diferença entre os tempos de geração e o de formação dessa bolha. A dependência linear encontrada é uma característica dos processos de difusão térmica com mudança de fase controlada por uma interface vapor-líquido.

As constantes de crescimento das bolhas de vapor na superfície de aquecimento, determinadas a partir dos dados experimentais,

não seguem a teoria assintótica de Scriven (17,18), segundo a qual essas constantes de crescimento dependem diretamente do grau de superaquecimento do líquido. Existe assim a necessidade de ser reexaminada essa teoria de utilização corrente sobre o crescimento de bolhas, a fim de ser determinada a importância relativa dos efeitos dinâmicos em ebulição nucleada heterogênea com geração transiente de energia.

Para generalização do modelo proposto poderão ser empregados em trabalhos futuros, outras formas para a geração de potência ou ainda rampas que alcancem maiores valores de potência, objetivando a determinação do ponto de fluxo máximo de calor (burn-out point). Esses estudos naturalmente deverão ser estendidos a outros líquidos.

Um avanço para a técnica experimental utilizada e que concorreria para maior rapidez na obtenção de dados, seria a utilização de outro computador, um do tipo PDP-20. Esse computador receberia os dados analógicos registrados pelo gravador de fita e os digitalizaria, podendo calcular diretamente as variáveis necessárias à interpretação do fenômeno, como a temperatura da placa, o fluxo de calor, etc.

REFERÊNCIAS BÁSICAS

1. AKIYAMA, M., TACHIBANA, F., KAWASHIMA, H. - Bubble Growth Rate in Transient Boiling. J.Nuclear Sci.Technol., vol.5, nº 3, pp.43-44, março 1968.
2. BERGLES, A.E. - Burnout in Boiling Heat Transfer. Part I: Pool-Boiling Systems. Nuclear Safety, vol.16, nº 1, pp. 29-42. Jan.-Fev.1975.
3. CARSLAW, H.S. e JAEGER, J.C. - Conduction of Heat in Solids. Oxford Press. London, 1959.
4. COLE, R. e SHULMAN, H.L. - Bubble Growth Rates at High Jakob Numbers. Int.J.Heat Mass Transfer, vol.9, pp.1377-1390, (1966).
5. COOPER, M.G. - The Microlayer and Bubble Growth in Nucleate Pool-Boiling. Int.J.Heat Mass Transfer, vol.12, pp.915-933. (1969).
6. COOPER, M.G. e LLOYD, A.J.P. - Transient local heat flux in nucleate boiling. Heat Transfer Conference, vol.III, pp. 193-203. Chicago, 1966.
7. FOLTZ, G.E. e MESLER, R.B. - The Measurement of Surface Temperature with Platinum Films During Nucleate Boiling of Water. A.I.Ch.E.Journal, vol.16, nº 1, pp.44-48. Jan.1970.
8. FOSTER, K. e ZUBER, N. - Growth of a vapour bubble in a superheated liquid. J.Appl.Phys., 1954, 25, pp.474-8.
9. HALL, W.B. e HARRISON, W.C. - Transient Boiling of Water at Atmospheric Pressure. Heat Transfer Conference, vol. III, pp.186-193. Chicago, 1966.

10. JOHNSON, H.A. - Transient Boiling Heat Transfer to Water. Int. J. Heat Mass Transfer, vol.14, nº 1, pp.67-82. Jan. 1971.
11. JOHNSON, H.A., SCHROCK, V.I. e outros - Transient Pool Boiling of Water at Atmospheric Pressure. International Developments in Heat Transfer. Proceedings of the 1961-2 International Heat Transfer Conference, pp. 244-254.
12. LEPPERT, G. e PITTS, C.C. - Boiling. Advances in Heat Transfer, pp. 185-266, 1968.
13. LURIE, H. JOHNSON, H.A. - Transient Pool Boiling of Water on a Vertical Surface with a Step in Heat Generation. Journal of Heat Transfer. Transaction of the ASME, pp.217-224. Agosto 1962.
14. ROGERS, T.F., MESLER, R.B. - An Experimental Study of Surface Cooling by Bubbles during Nucleate Boiling of Water. A.I.Ch.E. Journal, vol.10, nº 5, pp.656-659.
15. SADDY, M. - Studies on the Bubble Growth in Nucleate Boiling, Tese de Ph.D., University of London, Fev. 1970.
16. SAKURAI, A., MIZUKAMI, K. e outros - Experimental Studies on Transient Boiling Heat Transfer and Burnout. Proceedings of the Fourth International Heat Transfer Conference, vol. V; B3.4. Paris-Versailles - 1970.
17. SCRIVEN, L.E. - On dynamics of phase growth. Chemical Engineering Science, vol.10, 1959, nºs. 1-2.
18. SCRIVEN, L.E. - On dynamics of phase growth. Chemical Engineering Science, vol.17, 1962.
19. TACHIBANA, F., AKIYAMA, M. e outros - Incipient Boiling on Exponentially Heated Surfaces. J.Nucl.Sci.Technol., vol. 5, nº 3, pp.41-42. Março 1968.

20. TACHIBANA,F., AKIYAMA,M. e KAWAMURA,H. - Heat Transfer and Critical Heat Flux in Transient Boiling, (I): An Experimental Study in Saturated Pool Boiling. J. Nucl.Sci.Technol., vol.5, nº 3, pp.117-126. Março 1968.
21. TORIKAI,K. - Coefficient of Heat Transfer in Pool Boiling. Bulletin of the Japan Society Mechanical Engrs., vol.10, nº 41, pp.817-824, 1967.
22. VAN OUWERKERK,H.J. - The Rapid Growth of a Vapour Bubble at a Liquid-Solid Interface. Int.J.Heat Mass Transfer, vol.14, pp.1415-1431, 1971.
23. VAN STRALEN,S.J.D., SLUYTER,W.M. - Local Temperatures Fluctuations in Saturated Pool Boiling of Pure Liquids and Binary Mixtures. Int.J.Heat Mass Transfer, vol. 12, pp.187-198, 1969.
24. YIESIN,A.O., JEFFERS,D.E. - Bubble Growth in Transient Pool Boiling. Journal of the British Nuclear Energy Society, pp.267-274. Outubro 1969.
25. ZUBER,N. - The Dynamics of Vapor Bubbles in Nonuniform Temperature Fields. Int.J.Heat Mass Transfer, vol.2, pp. 83-98 (1961).

REFERÊNCIAS ADICIONAIS

- ABRAMOWITZ, M. e STEGUN, A.I. - Handbook of Mathematical Functions, 7^a ed. 1970, Dover Publications, Inc. New York.
- Digital Expansion System, DES-30, Electronic Associates, Inc. EAI, 1967, Publ.nº 00800.2042-1. New Jersey.
- PACITI, Tercio - Fortran-Monitor Princípios, Ao Livro Técnico S/A, 1967, R.J.
- PERRY, H. John - Chemical Engineers' Handbook, 4^a ed. Mc Graw Hill Book Co, 1965.
- Reference Handbook, EAI TR-48, Electronic Associates, Inc. EAI, 1967, Pub.nº 00800.2008-1. New Jersey.
- SELBY, M.S. - Standard Mathematical Tables, 15^a ed. 1967, The Chemical Rubber Co. Ohio.
- SPIEGEL, R.M. - Estatística. Edit. Mc Graw Hill do Brasil Ltda., 1972, R.J.
- SPIEGEL, R.M. - Laplace Transforms, 1^a ed. 1965, Schaum's Outline Series, Mc Graw Hill Book Company. New York.

SIMBOLOGIA

a	: difusividade térmica do líquido a temperatura de saturação.
A, B, C	: diâmetros da bolha gerada na superfície da placa, Fig. 2.12.
A_1, B_1	: constantes, Ap.3.
c	: calor específico do material da placa.
c_1, c_2	: coeficientes da variação de (c) com a temperatura.
$f(t, t_{oi})$: frequência de distribuição de tempos de residência para as bolhas.
H	: capacidade térmica da placa por unidade de área.
$i(t)$: corrente elétrica transiente na placa.
k	: constante de ajustagem para o número de bolhas na placa, § 4.3.
K	: condutividade térmica da água a temperatura de saturação.
K'	: constante unitária definida no Ap.3.
L	: comprimento característico, ver Ap.3.
M	: massa da placa.
N	: número de quadros filmados, § 2.5.2.
$N_b = N_b(t)$: número de bolhas na placa no tempo t .
$N_b(t, t_{oi})$: número de bolhas na placa no tempo t , formadas em t_{oi} .
N_o	: número de bolhas para o qual ocorre saturação.
m, n, p	: coeficientes da curva de variação da resistência da placa de platina com a temperatura, Ap.1.
$p(t)$: potência transiente gerada na placa.
P_e, P_s	: potências de entrada e saída, Figs. 2.3 e 2.5.

$q = q(t)$: fluxo de calor da placa para o líquido.
$q_b = q_b(t)$: fluxo de calor responsável pela formação de bolhas, § 3.4.1.
$q_c = q_c(t)$: fluxo de calor devido à condução transiente no líquido, § 3.3.
q_c^*	: fluxo de calor devido à condução transiente no tempo t^* , § 3.2.
$q_g = q_g(t)$: potência transiente gerada na placa.
q_i	: parâmetro linear da rampa transiente de potência gerada na placa, W/cm^2 .
q_o/t_o	: declividade da rampa transiente gerada na placa, W/cm^2s .
r, r'	: resistências ôhmicas da placa de platina, § 2.3.1 e Ap. 1.
$R = R(t)$: raio da bolha esférica equivalente em volume a um oblata esferóide, § 2.5.2.
$R(t, t_{oi})$: raio da bolha esférica no tempo t , formada em t_{oi} .
R_p	: resistência ôhmica do resistor padrão.
S	: parâmetro da transformada de Laplace.
S_p	: área da superfície total da placa de platina.
$T = T(x, t)$: temperatura do líquido.
T_a	: temperatura adiabática da placa.
T_w	: temperatura média da placa.
T_∞	: temperatura de saturação do líquido a pressão atmosférica.
t	: tempo.
t_c	: tempo característico definido no Ap.3.
t^*, t^*_{exp}	: tempo teórico e experimental de aparecimento da primeira bolha na superfície da placa, Fig.4.13.
t_{oi}	: tempo de formação da bolha de ordem i na superfície da placa, § 3.4.1.

- T' : duração em milisegundos da potência gerada.
- $V(t, t_{O1})$: volume da bolha esférica no tempo t , formada em t_{O1} .
- $V_{AB}=V_{AB}(t), V_B=V_B(t)$: tensões transientes em mV, medidas nas extremidades respectivamente do resistor padrão e da placa.
- x, X : distâncias verticais contadas a partir da superfície da placa, sendo $X= x/L$, § 3.3.
- β : constante de crescimento de bolhas, § 3.4.1.
- δ : espessura da camada limite térmica transiente, § 4.2.
- θ : temperatura adimensional do líquido, igual a $\frac{T - T_{\infty}}{T_{\infty}}$
- θ_1, θ_2 : temperaturas adimensionais definidas no Ap.3.
- λ : calor latente de vaporização da água.
- ρ : massa específica da água a temperatura de saturação.
- ρ_v : massa específica do vapor de água a pressão atmosférica e temperatura de saturação.
- τ : tempo adimensional e igual a t/t_c , Ap.3.

APÊNDICE 1

Variação da Resistência Ôhmica da Placa de Platina com a Temperatura

Na Fig. A.1 é representado o esquema da montagem utilizada para a determinação da variação da resistência ôhmica da placa de platina com a temperatura. A precisão obtida é de $0,1 \text{ m}\Omega/^{\circ}\text{C}$.

Os pontos experimentais foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados, resultando na faixa de 0 a 213°C a curva

$$r = 27,31264(1 + 2,3593 \times 10^{-3}T_w + 2,95536 \times 10^{-7}T_w^2)$$

para uma determinada placa. São assim determinados os coeficientes da curva de variação da resistência com a temperatura para as placas de platina utilizadas. Para se obter a curva de variação da resistência (r') na temperatura (T'_w) para esta placa é estabelecida a relação:

$$\frac{r}{r'} = \frac{(1 + mT_w + nT_w^2)}{(1 + mT'_w + nT'^2_w)}$$

sendo:

$$m = 2,3593 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$n = 2,95536 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$$

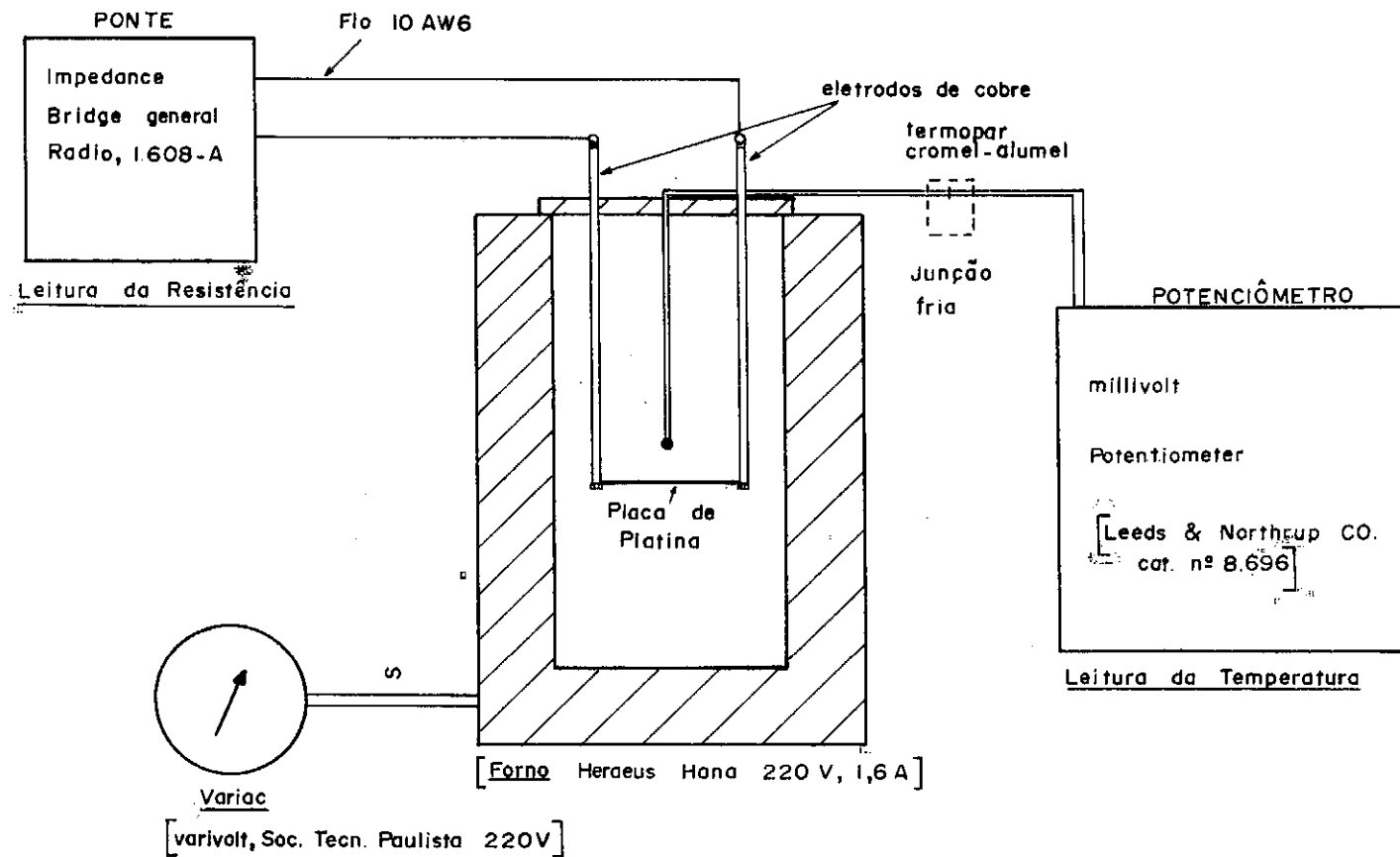


FIG. A.1 DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA PLATINA COM A TEMPERATURA.

APÊNDICE 2

Temperatura Adiabática da Placa

Para o sistema experimental descrito no § 2.3.1 pode ser determinado o perfil adiabático de temperatura. Para tanto considera-se que ao ser fornecido calor ao líquido por intermédio de geração transiente de potência na placa, este líquido em virtude de suas propriedades físicas: condutividade térmica e difusividade térmica, necessita de um determinado tempo para absorver certa quantidade de calor. Se o tempo necessário à absorção da quantidade de calor ultrapassar o intervalo de tempo em que essa quantidade de calor é gerada, a plaqueta terá uma elevação de temperatura de forma adiabática. Consequentemente será o perfil de temperaturas adiabático o máximo que as temperaturas da placa poderão atingir para uma determinada energia gerada na placa.

A energia gerada na placa num intervalo de tempo T' concorrerá somente para elevação de sua temperatura. Assim se T_∞ é a temperatura inicial da placa imersa no líquido, tem-se:

$$\int_{T_\infty}^{T_a} Mc \, d\theta = S_p \int_0^{T'} \left(q_i + \frac{q_o}{t_o} \right) dt$$

Considerando a massa M da plaqueta invariável com a temperatura e adotando para o calor específico c do material da placa (platina) a variação da forma,

$$c = c_1 + c_2 T_a = \left[0,1335211 + 0,0000248 T_a \right] \frac{J}{g^\circ C} ,$$

a temperatura adiabática da placa será determinada pela expressão:

$$T_a^2 + \frac{2c_1}{c_2} T_a - \frac{2S_p}{c_1 M} \left[q_i t + \frac{q_o}{2t_o} t^2 + \frac{M}{S_p} T_\infty \left(c_1 + \frac{c_2}{2} T_\infty \right) \right] = 0 \quad (A-1)$$

APÊNDICE 3

Temperatura da Placa e Fluxo de Calor Transmitido
ao Líquido por Condução Transiente

Para ser obtida a solução da Eq.(3-3), associada às condições (i), (ii) e (iii) descritas no Cap. 3, é necessário inicialmente se proceder a uma adimensionalização. Para tanto, adota-se:

$$X = \frac{x}{L} \quad , \quad \tau = \frac{t}{t_c} \quad , \quad \theta(X, \tau) = \frac{T(x, t) - T_\infty}{T_\infty}$$

sendo $t_c = \frac{aH^2}{K^2}$ e $L = \frac{aH}{K}$. Substituindo-se esses valores, obtém-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = K' \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} \quad (3-3)'$$

com as condições:

$$\tau = 0 \quad , \quad \theta(X, 0) = 0 \quad (i)'$$

$$X = 0 \quad , \quad \frac{Q(\tau)}{q_0} - \frac{HT_\infty}{q_0 t_c} \frac{d\theta}{d\tau} \Big|_{X=0} = \frac{-KT_\infty}{q_0 L} \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=0} \quad (ii)'$$

$$X \rightarrow \infty \quad , \quad \theta(\infty, \tau) = 0 \quad (iii)'$$

sendo $K' = \frac{at_c}{L^2} = 1$ e q_0 um valor constante em $t = t_0$.

A Eq.(3-3)' associada as condições (i)', (ii)' e (iii)' é resolvida pela teoria da transformada de Laplace, resultando:

$$\bar{\theta}(X, S) = A_1 e^{-\sqrt{S/K'}X} + B_1 e^{\sqrt{S/K'}X}$$

Substituindo as condições (ii)' e (iii)':

$$\bar{\theta}(X, S) = \frac{\frac{1}{q_0} \int (q'_g(\tau))}{\frac{HT_\infty}{q_0 t_c} S + \frac{KT_\infty}{q_0 L} \sqrt{S/K'}} e^{-\sqrt{S/K'} X}$$

como $q_g(\tau) = q_i + \frac{q_0}{t_c} t_c \tau$

$$\bar{\theta}(X, S) = \frac{t_c \cdot \frac{1}{S^2} \cdot e^{-\sqrt{S/K'} X}}{\frac{HT_\infty}{q_0 t_c} S + \frac{KT_\infty}{q_0 L} \sqrt{S/K'}} + \frac{q_i \cdot \frac{1}{S} e^{-\sqrt{S/K'} X}}{\frac{HT_\infty}{q_0 t_c} S + \frac{KT_\infty}{q_0 L} \sqrt{S/K'}}$$

$$\bar{\theta}(X, S) = \bar{\theta}_1(X, S) + \bar{\theta}_2(X, S)$$

Aplicando a anti-transformada de Laplace, obtêm-se:

$$\theta(X, \tau) = \theta_1(X, \tau) + \theta_2(X, \tau) \quad (3-4)$$

sendo, $\frac{HT_\infty}{q_0 t_c^2} t_c \theta_1(X, \tau) = e^{X+\tau} \operatorname{erfc}\left(\frac{X}{2\sqrt{\tau}} + \sqrt{\tau}\right) +$

$$- \operatorname{erfc}\left(\frac{X}{2\sqrt{\tau}}\right) \left[1 + X + \tau + \frac{X^2}{2} + \tau X + \frac{X^3}{6} \right] +$$

$$+ \frac{e^{-\frac{X^2}{4\tau}}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\tau} \left[2 + \frac{4}{3} \tau + X + \frac{1}{3} X^2 \right]$$

$$\frac{HT_\infty}{q_i t_c} \theta_2(X, \tau) = e^{X+\tau} \operatorname{erfc}\left(\frac{X}{2\sqrt{\tau}} + \sqrt{\tau}\right) - (1+X) \operatorname{erfc}\left(\frac{X}{2\sqrt{\tau}}\right) + \frac{2\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{X^2}{4\tau}}.$$

Substituindo neste resultado a condição (i)', resulta:

$$\theta_1(0, \tau) = \frac{q_o t_c^2}{H t_o T_\infty} \left[\frac{4}{3\sqrt{\pi}} \tau^{3/2} - \tau + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \tau^{1/2} - 1 + e^\tau \operatorname{erfc} \sqrt{\tau} \right]$$

$$\theta_2(0, \tau) = \frac{q_i t_c}{H T_\infty} \left[e^\tau \operatorname{erfc} \sqrt{\tau} - 1 + \frac{2\tau^{1/2}}{\sqrt{\pi}} \right],$$

sendo

$$\theta(0, \tau) = \theta_1(0, \tau) + \theta_2(0, \tau) \quad (3-5)$$

a temperatura adimensional média na placa.

O fluxo adimensional de calor que passa da placa para o líquido será então definido pela condição (ii)' aplicada a expressão de $\theta(x, \tau)$:

$$\left. \frac{\partial \theta_1(X, \tau)}{\partial X} \right|_{X=0} = \frac{q_o t_c^2}{H t_o T_\infty} \left[-\tau + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \tau^{1/2} + e^\tau \operatorname{erfc} \sqrt{\tau} \right]$$

$$\left. \frac{\partial \theta_2(X, \tau)}{\partial X} \right|_{X=0} = \frac{q_i a H}{K^2 T_\infty} \left[e^\tau \operatorname{erfc} \sqrt{\tau} - 1 \right]$$

e

$$\left. \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \right|_{X=0} = \left. \frac{\partial \theta_1(X, \tau)}{\partial X} \right|_{X=0} + \left. \frac{\partial \theta_2(X, \tau)}{\partial X} \right|_{X=0} \quad (3-6)$$

Exprimindo as Eqs. (3-4) e (3-5) respectivamente em termos de temperatura e fluxo adimensional, resulta:

$$T(0,t) = T_w(t) =$$

$$T_{\infty} + \frac{q_o t_c^2}{H t_o} \left[\frac{4}{3\sqrt{\pi}} \tau^{3/2} - \tau + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \tau^{1/2} - 1 + e^{\tau} \operatorname{erfc} \sqrt{\tau} \right] +$$

$$+ \frac{q_i t_c}{H} \left[e^{\tau} \operatorname{erfc} \sqrt{\tau} - 1 + \frac{2\tau^{1/2}}{\sqrt{\pi}} \right] \quad (3-7)$$

$$q_c = q_c(t) = \frac{q_o t_c}{t_o} \left[\tau - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \tau^{1/2} + 1 - e^{\tau} \operatorname{erfc} \sqrt{\tau} \right] + q_i \left[1 - e^{\tau} \operatorname{erfc} \sqrt{\tau} \right]$$

(3-8)

A espessura (δ) da camada limite térmica transiente definida no § 3.2 é determinada a partir da Eq. (3-4) fazendo $\theta = 0,01$.

APÊNDICE 4

FOTOGRAFIAS

Foto 1 - Célula de ebulição
e eletrodos

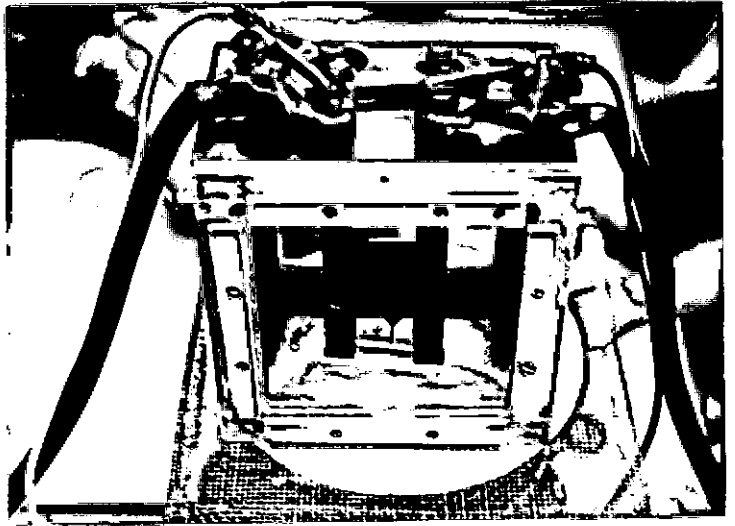
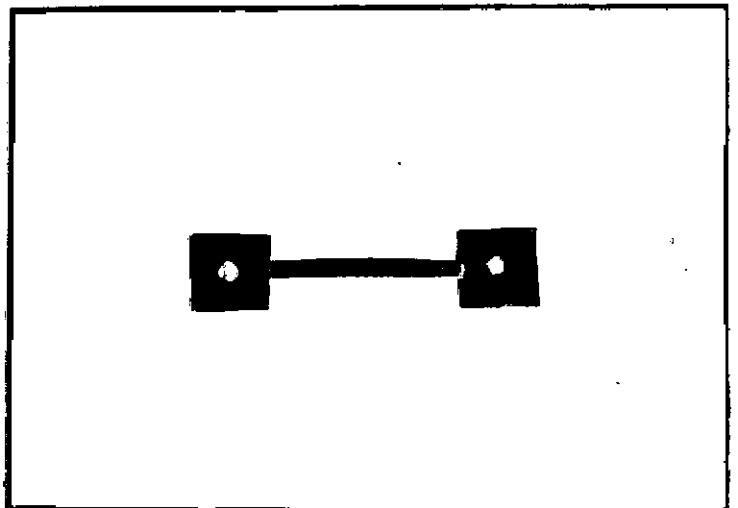


Foto 2 - Plaqueta de platina fi-
xada nos eletrodos e es-
tílete de diâmetro cali-
brado



Foto 3 - Plaqueta de platina



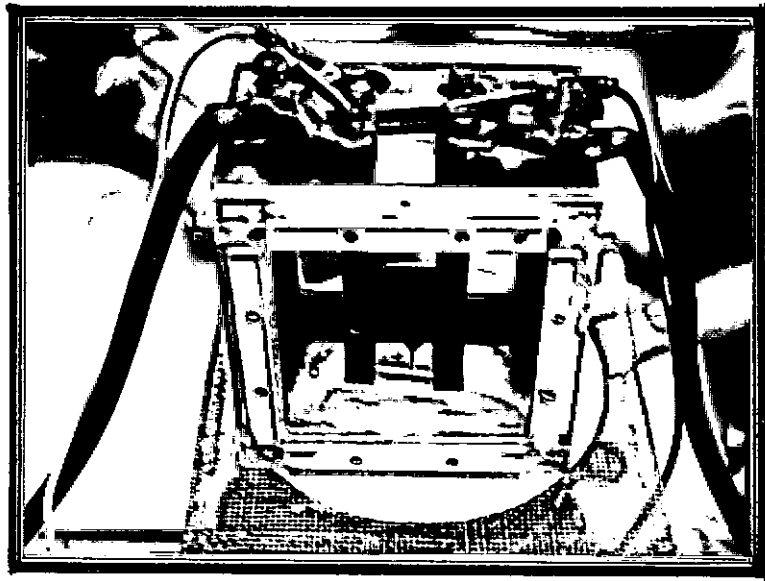


FOTO 1 _ Célula de ebulição e eletrodos

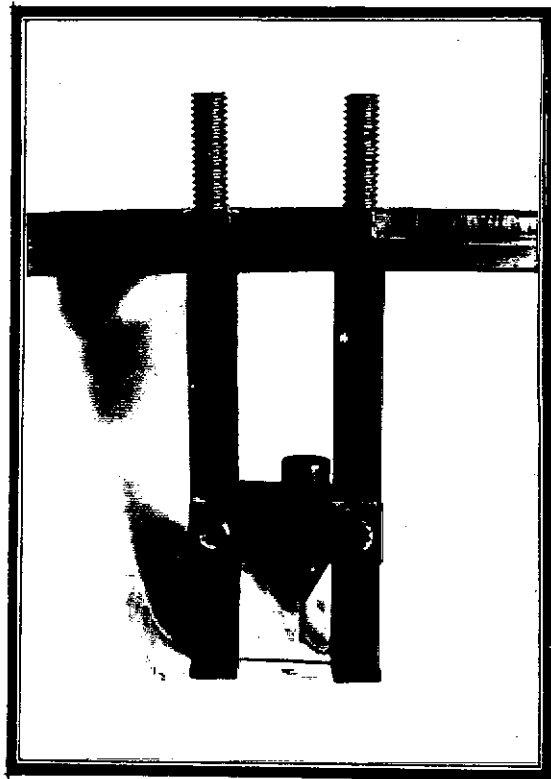


FOTO 2 _ Plaqueta de platina fixada nos eletrodos e estilete de diametro calibrado

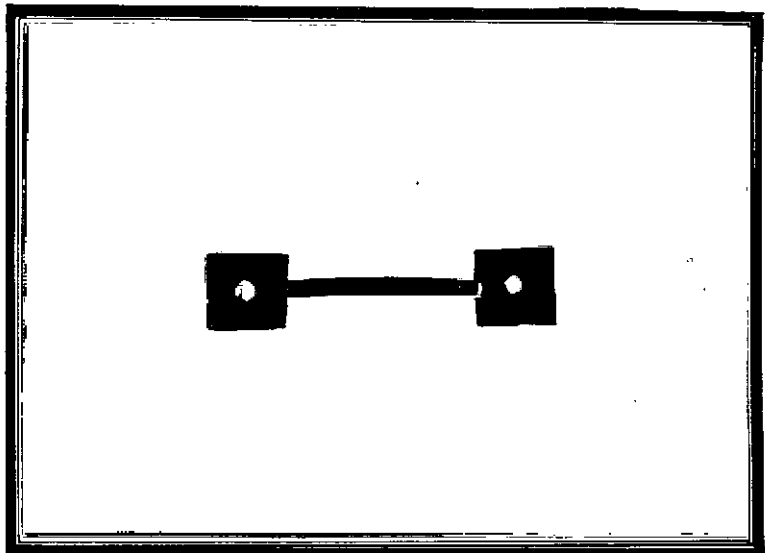


FOTO 3 _ Plaqueta de platina

FOTO 4 - Vista parcial do equipamento

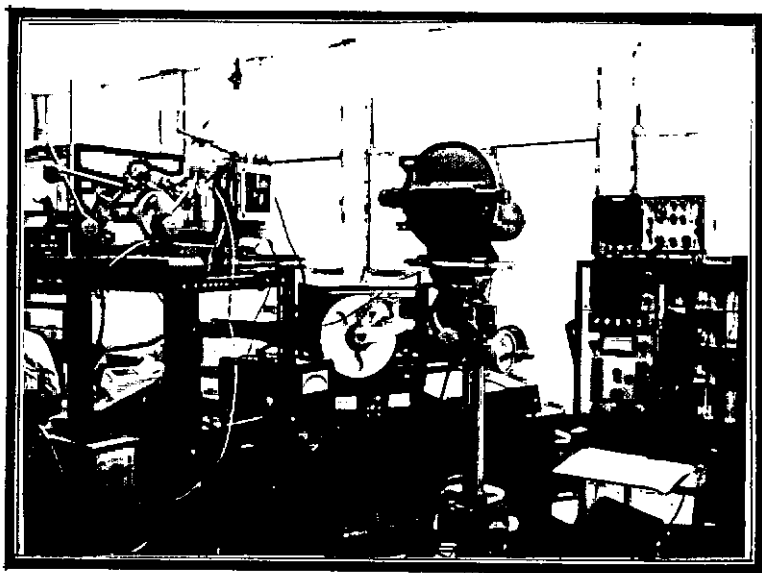


FOTO 5 - Detalhe da célula de ebulição :
perfil da plaqueta e estilete cali-
brado.

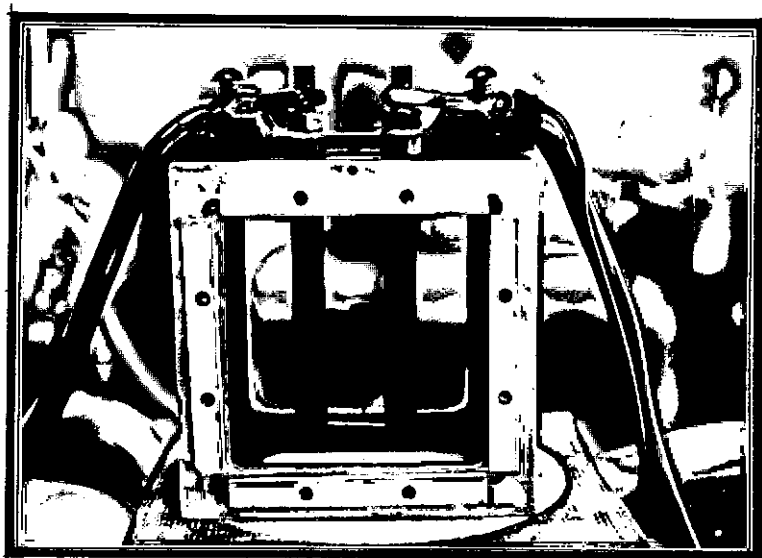


Foto 4 - Vista parcial do
equipamento

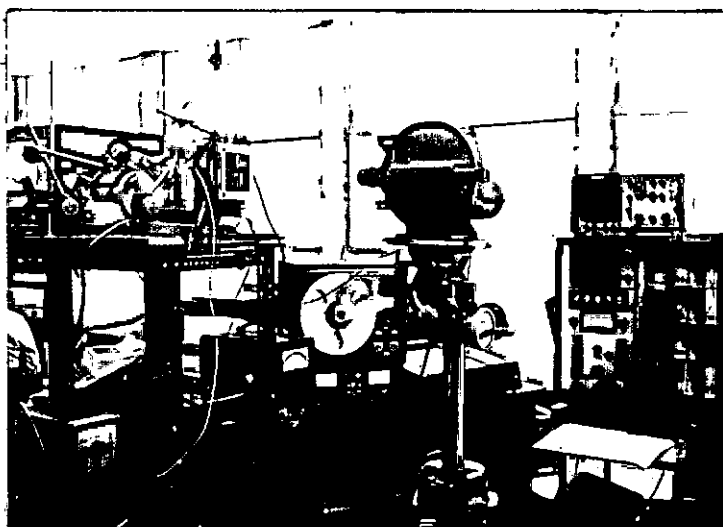
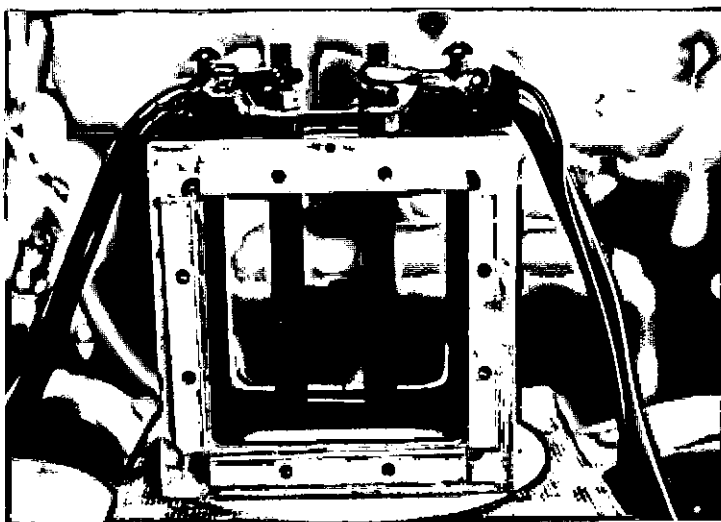


Foto 5 - Detalhe da célula
de ebulição: per-
fil da plaqueta e
estilete calibra-
do



APÊNDICE 5

DADOS EXPERIMENTAIS

Dados Experimentais:

$$q_0/t_0 = 77,83 \text{ W/cm}^2\text{s}$$

$$q_i = 0$$

$$T_\infty = 100^\circ\text{C} \quad , \quad T' = 200 \text{ ms}$$

BOLHA Nº	QUADRO Nº	TEMPO (ms)	A (mm)	B (mm)	C (mm)
1	173	38,79	0,24540	0,28432	0,24540
	197	44,17	0,38594	0,40540	0,38594
	220	49,33	0,50595	0,51135	0,3427
	240	53,81	0,62162	0,62595	0,40757
	260	58,30	0,71676	0,73297	0,48324
	280	62,78	0,70919	0,86270	0,45405
	300	67,27	0,93297	0,93080	0,58162
	320	71,75	1,04432	1,05838	0,60757
	340	76,23	1,31460	1,20000	0,82378
	360	80,72	1,41081	1,33840	0,77081
	380	85,20	1,52757	1,39676	0,86703
	420	94,17	1,86122	1,61081	1,00432
	440	98,66	1,88540	1,72865	1,09513
	480	107,62	2,15568	1,98378	1,24108
	500	112,11	2,42595	2,04649	1,44649

Dados Experimentais:

$$q_0/t_0 = 77,83 \text{ W/cm}^2\text{s}$$

$$q_i = 0$$

$$T_\infty = 100^\circ\text{C} \quad , \quad T' = 200 \text{ ms}$$

BOLHA Nº	QUADRO Nº	TEMPO (ms)	A (mm)	B (mm)	C (mm)
	600	134,53	0,56860	0,35240	0,56860
	601	134,75	1,25411	0,66700	1,10590
	602	134,98	1,61192	0,89081	1,41622
	603	135,20	1,83683	1,03142	1,60111
	604	135,43	2,06924	1,14380	1,71779
	607	136,10	2,47890	1,40429	1,94702
	610	136,78	2,82273	1,62379	2,11353
	613	137,44	2,93192	1,74050	2,15572
	616	138,12	3,07034	1,91781	2,14274
	619	138,79	3,17625	2,03462	2,09953
	622	139,46	3,26923	2,14490	2,12434
	627	140,58	3,33951	2,36859	2,13083
	632	141,70	3,34920	2,52429	1,93301
	637	142,83	3,3200	2,70382	1,92434
	642	143,95	3,28651	2,88223	1,9449
	647	145,07	3,20539	3,00222	1,94705
2	652	146,19	3,16971	3,14273	1,92653
	672	150,67	3,16000	3,10812	1,92000
	692	155,16	3,57510	2,0000	1,98493
	712	159,64	4,09732	2,61301	3,03460
	732	164,13	4,62701	2,83142	3,45302
	742	166,37	4,72542	2,90052	3,25951
	752	168,61	4,76969	2,97083	3,28432
	762	170,85	4,72860	3,15242	3,31573
	782	175,34	4,67888	3,59571	3,28652
	802	179,82	4,66160	3,74810	3,23142
	822	184,30	4,77731	3,48973	3,18703
	832	186,55	4,88651	3,46702	3,28854
	842	188,79	5,05410	3,43681	3,32320
	852	191,03	5,21410	3,36004	3,56764
	862	193,27	5,34492	3,38923	3,83683
	872	195,52	5,47683	3,32974	4,09512
	882	197,76	5,62921	3,32540	4,41304
	891	199,78	5,78383	3,34593	4,41953

Dados Experimentais:

$$q_o/t_o = 83,54 \text{ W/cm}^2\text{s}$$

$$q_i = 0$$

$$T_\infty = 100^\circ\text{C} \quad , \quad T' \approx 191,25 \text{ ms}$$

BOLHA Nº	QUADRO Nº	TEMPO (ms)	A (mm)	B (mm)	C (mm)
1	173	38,25	0,24540	0,28432	0,24540
	197	43,56	0,38713	0,38931	0,20175
	220	48,64	0,50595	0,51135	0,34273
	240	53,06	0,62162	0,62595	0,40757
	260	57,48	0,71676	0,73297	0,48324
	280	61,91	0,70919	0,86270	0,45405
	300	66,33	0,93298	0,93081	0,58162
	320	70,75	1,04432	1,05838	0,60757
	340	75,17	1,31459	1,20000	0,82378
	360	79,59	1,41081	1,33838	0,77081
	380	84,02	1,52757	1,39676	0,86703
	420	92,86	1,86122	1,61081	1,00432
	440	97,28	1,88540	1,72865	1,09513
	480	106,13	2,15568	1,98378	1,24108
	500	110,55	2,42595	2,04649	1,44649
	510	112,76	2,50811	2,06810	1,55676
	515	113,87	2,54635	2,07960	1,44820
2	242	53,51	0,29989	0,23119	0,29989
	247	54,61	0,33370	0,29008	0,33370
	257	56,82	0,43511	0,44711	0,43511
	267	59,03	0,52017	0,51145	0,52017
	287	63,45	0,71974	0,67612	0,53871
	307	67,88	0,86478	0,81898	0,65431
	327	72,30	1,03162	0,97383	0,66849
	347	76,72	1,14504	1,07743	0,81461
	367	81,14	1,37950	1,21592	0,88768
	387	85,56	1,47110	1,30534	0,94875
	407	89,99	1,64013	1,37950	1,04689
	427	94,41	1,70229	1,50709	1,13522
	447	98,83	1,96837	1,57361	1,24427
	467	103,25	2,08179	1,61614	1,37295
	487	107,67	2,16249	1,72955	1,48201

Dados Experimentais:

$$q_o/t_o = 83,54 \text{ W/cm}^2\text{s}$$

$$q_i = 0$$

$$T_\infty = 100^\circ\text{C} \quad , \quad T' = 191,25 \text{ ms}$$

BOLHA Nº	QUADRO Nº	TEMPO (ms)	A (mm)	B (mm)	C (mm)
3	412	91,10	0,56161	0,36641	0,56161
	413	91,32	0,77535	0,39150	0,68920
	418	92,42	1,16139	0,95529	0,78101
	420	92,86	1,19847	1,04689	0,63904
	423	93,52	1,18321	1,16030	0,65213
	428	94,63	1,13958	1,34787	0,63795
	433	95,73	1,15485	1,29117	0,67175
	435	96,18	1,25082	1,24100	0,67285
	440	97,28	1,35878	1,11232	0,84842
	445	98,39	1,47873	1,18321	1,06434
	455	100,60	1,60741	1,39040	1,03381
	465	102,81	1,61832	1,62486	0,93784
	475	105,02	1,67939	1,67939	0,98146
	485	107,23	1,84733	1,59760	1,09269
	495	109,44	2,00763	1,63359	1,25954
	505	111,65	2,06980	1,78408	1,27263
	510	112,76	2,13522	1,87786	1,31516
	515	113,86	2,12650	1,91603	1,20938
4	537	118,73	0,52017	0,59433	0,52017
	538	118,95	0,69138	0,45147	0,69138
	539	119,17	0,79389	0,51690	0,79389
	543	120,06	0,89967	0,69356	0,89967
	545	120,50	0,97601	0,70992	0,97601
	550	121,60	0,97056	0,64994	0,56707
	555	122,71	0,89204	0,93239	0,61614
	560	123,81	0,85060	0,87786	0,64231
	565	124,92	0,86805	0,89422	0,55398

Dados Experimentais:

$$q_o/t_o = 83,54 \text{ W/cm}^2\text{s}$$

$$q_i = 0$$

$$T_{\infty} = 100^{\circ}\text{C} \quad , \quad T' = 191,25 \text{ ms}$$

BOLHA Nº	QUADRO Nº	TEMPO (ms)	A (mm)	B (mm)	C (mm)
1+3	540	119,39	3,22355	2,45916	3,10905
	545	120,50	3,06979	2,62813	2,75682
	550	121,60	2,96074	2,74482	2,49727
	555	122,71	2,98364	2,73173	2,39367
	565	124,92	3,14613	2,67830	2,42094
	575	127,13	3,51799	2,78735	2,48964
	585	129,34	4,41985	2,86150	2,73718
	595	131,55	4,41548	3,01963	3,01310
	605	133,76	4,63141	3,06543	3,33697
	625	138,19	4,47110	3,07743	3,31843
	635	140,40	4,28462	3,19302	3,22028
	655	144,82	4,19847	3,39476	3,19520
	675	149,24	4,49290	3,31516	3,26936
	695	153,66	4,93129	3,26499	3,31298
	705	155,87	5,12322	3,27917	3,60741
	723	159,85	5,28026	3,29117	4,11232
	743	164,28	5,19084	3,30098	3,99782
	763	168,70	5,11886	3,28244	4,54744
5	783	173,12	4,98582	3,07197	4,65322
	793	175,33	5,02181	2,88550	5,02181
	546	120,72	0,39149	0,29981	0,39149
	547	120,94	0,47546	0,40240	0,47546
	549	121,38	0,58124	0,54635	0,46674
	551	121,82	0,60523	0,56707	0,47873
6	553	122,27	0,56161	0,64340	0,33806
	554	122,49	0,56816	0,72083	0,28135
	577	127,57	0,37077	0,36750	0,37077
	578	127,79	0,53544	0,43184	0,53544
	579	128,01	0,56379	0,46782	0,56379
	581	128,46	0,67394	0,53217	0,67394
	585	129,34	0,72083	0,67612	0,56488
	588	130,00	0,71974	0,85496	0,37405

Dados Experimentais:

$$q_o/t_o = 83,54 \text{ W/cm}^2\text{s}$$

$$q_i = 0$$

$$T_\infty = 100^\circ\text{C} \quad , \quad T' = 191,25 \text{ ms}$$

BOLHA Nº	QUADRO Nº	TEMPO (ms)	A (mm)	B (mm)	C (mm)
7	600	132,66	0,47546	0,09924	0,47546
	601	132,88	0,56816	0,49836	0,56816
	603	133,32	0,69684	0,54198	0,69684
	604	133,54	0,71428	0,57470	0,71428
	606	133,98	0,71865	0,64776	0,71865
	609	134,65	0,71428	0,71538	0,59215
	610	134,87	0,76336	0,74591	0,52017
	613	135,53	0,69138	0,83642	0,45801
8	616	136,20	0,26717	0,26827	0,26717
	617	136,42	0,66848	0,41985	0,66848
	619	136,86	0,89858	0,59978	0,89858
	623	137,74	1,09269	0,79716	0,98473
	628	138,85	1,11996	0,97819	0,85605
	633	139,95	1,10796	1,09924	0,65213
	638	141,06	0,94547	1,23228	0,54635
	639	141,28	1,01199	1,23990	0,34242
9	621	137,30	0,41548	0,33915	0,41548
	622	137,52	0,54089	0,47110	0,54089
	623	137,74	0,59105	0,49727	0,59106
	628	138,85	0,69138	0,60414	0,50273
	629	139,07	0,65431	0,63250	0,54089
	630	139,29	0,69575	0,69029	0,54526
	632	139,73	0,67939	0,75900	0,43402
	633	139,95	0,67175	0,87241	0,37514
10	638	141,06	0,39258	0,33806	0,39258
	642	141,94	0,59106	0,51145	0,59106
	643	142,17	0,61941	0,54853	0,61941
	646	142,83	0,65867	0,56707	0,65867
	647	143,05	0,64122	0,61396	0,47328
	649	143,49	0,64667	0,53871	0,45474
	651	143,94	0,59323	0,77644	0,36423
	652	144,16	0,63685	0,84515	0,26390

Dados Experimentais:

$$q_o/t_o = 83,54 \text{ W/cm}^2\text{s}$$

$$q_i = 0$$

$$T_\infty = 100^\circ\text{C} \quad , \quad T' = 191,25 \text{ ms}$$

BOLHA Nº	QUADRO Nº	TEMPO (ms)	A (mm)	B (mm)	C (mm)
11	656	145,04	0,46020	0,41876	0,46020
	657	145,26	0,56925	0,51036	0,56925
	659	145,70	0,61723	0,53217	0,46565
	661	146,15	0,65322	0,57361	0,56598
	665	147,03	0,63577	0,65867	0,54310
	666	147,25	0,66957	0,64340	0,47983
	667	147,47	0,65649	0,82334	0,37078
12	672	148,58	0,33261	0,31742	0,33260
	673	148,80	0,55616	0,42641	0,55616
	675	149,24	0,63250	0,57910	0,53110
	677	149,68	0,65976	0,66302	0,57031
	679	150,13	0,70883	0,66854	0,50600
	681	150,57	0,70120	0,74812	0,49620
	683	151,01	0,75681	0,85281	0,47981
	684	151,23	0,68593	0,81898	0,37077
13	685	151,45	0,62705	0,88331	0,21265
	696	153,88	0,33806	0,30101	0,33806
	698	154,33	0,47440	0,43079	0,47440
	701	154,99	0,52452	0,54526	0,52454

Dados Experimentais:

$$q_o/t_o = 127,15 \text{ W/cm}^2\text{s}$$

$$q_i = 0,3295 \text{ W/cm}^2$$

$$T_\infty = 100^\circ\text{C} \quad , \quad T' = 191,25 \text{ ms.}$$

BOLHA Nº	QUADRO Nº	TEMPO (ms)	A (mm)	B (mm)	C (mm)
1	84	27,65	0,35366	0,35244	0,35366
	94	30,94	0,43293	0,37439	0,43293
	104	34,23	0,42927	0,46341	0,42927
	119	39,17	0,42073	0,44756	0,42073
	129	42,46	0,47805	0,54146	0,34512
	134	44,11	0,43536	0,50366	0,32927
2	86	28,31	0,27073	0,30122	0,27073
	91	29,95	0,39146	0,46220	0,30366
	96	31,60	0,53658	0,56341	0,35976
	101	33,25	0,57927	0,62195	0,32317
	106	34,89	0,68536	0,72683	0,40488
	111	36,54	0,68293	0,74634	0,341463
	113	37,20	0,65854	0,71342	0,48780
3	112	36,87	0,25610	0,14146	0,25610
	113	37,20	0,37805	0,39024	0,37805
2+3	170	55,96	1,62195	1,35610	1,12805
	175	57,60	1,86951	1,59760	1,52683
	180	59,25	2,26214	1,87810	1,61707
	185	60,90	2,33293	1,87221	1,00610
	190	62,54	1,98171	1,92705	0,82317
	195	64,19	1,96830	2,09151	0,96342
	200	65,83	2,04390	2,19513	1,09390
	205	67,48	2,36219	2,08665	0,94512
	210	69,13	2,61098	2,30000	1,20366
	215	70,77	2,69512	2,15849	1,41585
	220	72,42	2,62195	2,11578	1,83293
	225	74,06	2,59146	2,25608	1,76219
	230	75,71	2,81463	2,38409	1,67561
	235	77,36	2,93902	2,35975	1,70122
	240	79,00	3,00732	2,42683	1,83536
	245	80,65	3,20244	2,55122	1,72073
	250	82,30	3,35854	2,72561	2,05732
	255	83,94	3,58293	2,81097	2,20976
	265	87,23	3,84268	3,00732	2,31707
	270	88,80	3,90366	3,05854	2,31097
	280	92,17	4,14756	3,15000	2,21097
	285	93,81	4,14146	3,18293	2,48415
	290	95,46	4,15122	3,21097	2,50488

Dados Experimentais:

$$q_o/t_o = 127,15 \text{ W/cm}^2\text{s}$$

$$q_i = 0,3295 \text{ W/cm}^2$$

$$T_\infty = 100^\circ\text{C} \quad , \quad T' = 191,25 \text{ ms.}$$

BOLHA Nº	QUADRO Nº	TEMPO (ms)	A (mm)	B (mm)	C (mm)
2+3	300	98,75	4,33293	3,38780	2,82683
	310	102,04	4,57317	3,38902	3,13658
	320	105,33	4,69512	3,34512	3,30854
	330	108,63	5,00610	3,45122	3,53658
	340	111,92	5,23902	3,48293	3,87683
	345	113,56	5,03902	3,55244	3,16951
	350	115,21	4,71951	3,67927	3,70609
	355	116,86	4,74634	3,74146	4,06707
	365	120,15	5,31951	3,72317	4,27317
	370	121,79	5,51219	3,98171	4,65854
	375	123,44	5,66463	3,90976	4,37805
	380	125,09	5,44512	3,95122	4,29146
4	157	51,68	0,31707	0,27317	0,31707
	158	52,00	0,58536	0,45244	0,58536
	159	52,34	0,70488	0,57561	0,52683
	160	52,67	0,78902	0,64878	0,49512
	162	53,33	0,72195	0,85122	0,38171
	163	53,65	0,72317	0,93658	0,32439
	164	53,98	0,66951	0,95610	0,36097
	167	54,97	0,71951	0,96097	0,33902
	170	55,96	0,86829	0,80732	0,47561
	175	57,61	1,04756	0,89390	0,68293
	180	59,25	1,09878	1,13658	0,77927
	185	60,90	1,04512	1,31707	0,57073
	190	62,51	1,18780	1,14390	0,65854
	195	64,19	1,31097	1,07927	0,75732
	200	65,83	1,36829	1,21951	0,86097
	205	67,48	1,42439	1,38780	0,80732
	210	69,13	1,40488	1,55268	0,77805
	220	72,42	1,53658	1,54268	0,90122
	230	75,71	1,68780	1,56097	1,07683
	235	77,36	1,77195	1,65366	1,09756
	245	80,65	1,95000	1,83293	1,02805
	255	83,94	2,07195	1,89024	1,14756
	260	85,58	2,02927	1,91951	1,12317
	261	85,91	2,06342	1,88780	1,16219

Dados Experimentais:

$$q_0/t_0 = 127,15 \text{ W/cm}^2\text{s}$$

$$q_1 = 0,3295 \text{ W/cm}^2$$

$$T_\infty = 100^\circ\text{C} \quad , \quad T' = 191,25 \text{ ms.}$$

BOLHA Nº	QUADRO Nº	TEMPO (ms)	A (mm)	B (mm)	C (mm)
5	247	81,31	2,37561	2,28658	1,61829
	250	82,29	2,45366	2,26829	1,74024
	255	83,94	2,61097	2,34146	1,71463
	260	85,58	2,80488	2,44390	1,77927
	265	87,23	2,91219	2,58171	1,67805
	270	88,90	3,08171	2,68293	1,89634
	275	90,52	3,04512	2,66585	1,64756
	285	93,81	3,00488	2,58171	1,95000
	295	97,11	3,11341	2,57927	2,08780
	300	98,75	3,20488	2,54634	2,28171
	305	100,40	3,33902	2,54756	2,37073
	310	102,04	3,53780	2,53415	2,68171